

Ф.П.Пресс



Ф.П.Пресс

Фоточувствительные ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

· Радио и связь ·

Ф.П.Пресс

Фоточувствительные
ПРИБОРЫ
С ЗАРЯДОВОЙ
СВЯЗЬЮ



Москва
«Радио и связь»
1991



Scan AAW

ББК 23.2.3.7
П71
УДК 621.382.3.

Рецензент канд. техн. наук В. Я. Стенин

Редакция литературы по электронике

Пресс Ф. П.

П71 Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. —
М.: Радио и связь, 1991. — 264 с.: ил.
ISBN 5-256-00855-2.

Рассмотрены принципы работы нового класса преобразователей изображения — фоточувствительных приборов с зарядовой связью. Описаны типы и характеристики линейных и матричных фоточувствительных приборов такого типа, излагаются основы их проектирования и изготовления. Приведены параметры отечественных фоточувствительных приборов с зарядовой связью и области их применения.

Для инженерно-технических работников.

П 2302030200-068 — 77-91
 046(01)-91

ББК 23.2.3.7

ISBN 5-256-00855-2

© Пресс Ф. П., 1991

Предисловие

Двадцать лет тому назад В. Бойл и Д. Смит показали на примитивном «прародителе» современных приборов с зарядовой связью (ПЗС), что между близко расположенными МОП-конденсаторами возможен обмен зарядами — зарядовая связь. Манипулируя смещениями, прикладываемыми к таким МОП-конденсаторам, можно накапливать заряды, перемещать их, разделять, объединять, т. е. осуществлять аналоговую и цифровую обработку информации на дискретных, но связанных между собой элементах. Первые ПЗС насчитывали всего семь конденсаторов, в современных число элементов превышает миллион. Столь внушительный рост за сравнительно небольшой срок объясняется рядом причин. Во-первых, сам принцип зарядовой связи весьма привлекателен своей простотой и изяществом: информация в ПЗС передается зарядами без промежуточных преобразований заряда (тока) в потенциал и обратно, как это происходит, скажем, в цепочке связанных транзисторных элементов. Каждое преобразование характеризуется некоторой неопределенностью, следовательно, в ПЗС, где число преобразований сведено к минимуму (на входе и выходе), достижима обработка информации наиболее воспроизводимым образом. Во-вторых, ПЗС обладают исключительно функциональной широтой: пожалуй, кроме генерации сигналов, они могут выполнять любые действия, в основном связанные с накоплением и преобразованием информации. Изобретатели ПЗС пророчили им три основные сферы применения: преобразование излучения в электрический сигнал — фоточувствительные ПЗС (ФПЗС); аналоговую обработку информации — линии задержки, фильтры; запоминающие устройства ПЗС (ЗУ). Наибольшее развитие получило первое направление. В-третьих, конструктивно-технологические особенности ПЗС таковы, что в них достичь высокой степени интеграции легче, нежели в других БИС. Например, фоточувствительные ПЗС (ФПЗС) представляют собой регулярный массив сравнительно простых по топологии элементов, к которым нет нужды изготавливать индивидуальные контакты.

Почему из трех классов ПЗС выделились и заняли лидирующее положение именно ФПЗС? Дело в том, что ПЗС ЗУ и в какой-то мере ПЗС устройства аналоговой обработки должны были заменить собой уже существующие микросхемы, т. е. продемонстрировать высокую конкурентоспособность. Приборы с зарядовой связью ЗУ «проиграли в соревновании» с хорошо освоенными и быстро развивающимися динамическими МОП ЗУ. Аналоговые ПЗС-устройства постепенно теснят привычные биполярные и МОП-линии

задержки, но говорить о преимущественном положении рано. Иная ситуация сложилась с ФПЗС: они, по сути, заполнили вакуум в прямом и переносном смысле в такой важной области науки и техники, как телевидение. Впервые в телевидение пришли твердотельные преобразователи излучения в видеосигнал, способные не только заменить вакуумные электронно-лучевые трубки (ЭЛТ), но и привнести с собою новые качества. Жесткий геометрический растр, возможность обработки информации непосредственно на кристалле, нечувствительность к магнитным полям — далеко не полный перечень специфических свойств ФПЗС, не реализуемых в ЭЛТ. Таблица П1 сравнительных характеристик ФПЗС и ЭЛТ достаточно убедительно демонстрирует достоинства ФПЗС [1].

К настоящему времени в СССР и во всех развитых странах ФПЗС выпускаются серийно, появился специальный термин «твердотельное телевидение». Сложились отечественные кадры ученых, разработчиков и технологов, среди которых можно назвать имена

Т а б л и ц а П 1

Сравнительные характеристики ФПЗС и ЭЛТ

Характеристика	ФПЗС	ЭЛТ	Примечание
Пороговая чувствительность	Высокая	—	Выходная емкость меньше у ФПЗС
Разрешение	600 телевизионных (ТВ) линий в матрицах, несколько тысяч ТВ-линий при гибридной сборке	—	—
Растр	Жесткий (точность $\pm 0,5$ мкм)	Плавающий	Новое качество
Обработка информации внутри прибора	Осуществима	Невозможна	То же
Произвольная выборка	—»—	—»—	—»—
Инерционность	Практически отсутствует	15 ... 40%	—
Потребляемая мощность, Вт	0,5	5	—
Питающие напряжения, В	5 ... 25	200 ... 10 000	—
Масса, г	5	50	—
Объем, см ³	0,5	5	—
Долговечность, ч	15 000	500 ... 800	—
Механическая прочность, г	до 20 000	1000	—
Взрывоопасность	Отсутствует	Присуща	Новое качество
Микрофонный эффект	—»—	Присущ	То же
Чувствительность к магнитным полям	—»—	Присуща	—»—

К. А. Валиева, А. В. Ржанова, Я. А. Федотова, Ю. Р. Носова, В. А. Шилина, В. А. Литовченко, Р. А. Суриса, Ю. П. Докучаева, Ю. А. Кузнецова, А. В. Вето, М. М. Крымко, Е. В. Костюкова, А. С. Скрылева, Г. Я. Пригожина, Р. М. Степанова, А. Н. Писаревского, Б. А. Котова, В. Ю. Березина. Большой вклад в разработку микросхем-управления и аппаратуры на ФПЗС внесли В. А. Володин, Б. И. Гольдшер, Л. И. Хромов, З. М. Славинский, И. П. Кагановский, Н. Е. Уваров, В. Я. Стенин. Библиография ПЗС насчитывает сотни публикаций. К наиболее крупным работам можно отнести книги Ю. Р. Носова и В. А. Шилина «Основы физики приборов с зарядовой связью», В. Я. Стенина «Применение приборов с зарядовой связью», сборник под редакцией Л. И. Хромова «Твердотельное телевидение».

В то же время налицо потребность в книге, специализированной по всем вопросам, связанным с ФПЗС, — от принципа действия до практического применения. Предлагаемая книга построена практически целиком на отечественных публикациях. Этот факт весьма знаменателен и свидетельствует о том, что в стране решена важная народнохозяйственная задача: создана новая перспективная отрасль науки и техники — производство твердотельных преобразователей лучистой энергии на основе ФПЗС и видео- и другой микроэлектронной аппаратуры. Выпускаются: средне- и крупноформатные матричные ФПЗС с числом элементов 288×232 , 580×360 , 576×512 ; линейные ФПЗС с 1024 и 2048 элементами; ФПЗС, работающие в режиме временной задержки и накопления и позволяющие собирать их в гибридные «суперлинейки» с числом элементов до нескольких тысяч. Первое поколение отечественных ФПЗС — трехфазные, с поверхностным каналом — дополняется ФПЗС второго поколения с объемным каналом, двух-, трех- и четырехфазными, отличающимися высоким быстродействием, лучшей эффективностью переноса зарядовых пакетов и более простым управлением.

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью нашли применение в аппаратуре широкого спектра: в промышленных ТВ-камерах; робототехнических комплексах и системах технического зрения; прецизионных измерителях координат; сборочном оборудовании; оптических и радиотелескопах; бортовой космической аппаратуре; системах ввода графической информации в ЭВМ и многих др.

В гл. 1 объясняются принципы работы ПЗС; гл. 2 знакомит с типами и характеристиками ФПЗС; гл. 3 посвящена вопросу проектирования и изготовления ФПЗС; гл. 4 и 5 близки по содержанию, в них приводятся параметры отечественных ФПЗС и описываются конкретные разработки аппаратуры на ФПЗС. В заключении освещаются перспективы развития техники ФПЗС. Тем, кто впервые знакомится с ПЗС, полезно обратить внимание на гл. 1 и 2. Для разработчиков и технологов ФПЗС, очевидно, интерес представляют гл. 1—3 и, наконец, к «примененцам» обращены гл. 2, 4 и 5.

ОСНОВЫ РАБОТЫ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

1.1. МОП-емкость — элемент прибора с зарядовой связью

При всем многообразии приборов с переносом зарядов — а на сегодняшний день насчитывается не один десяток видов ПЗС, включая ФПЗС, ПЗС ЗУ и аналоговые ПЗС — основой большинства из них является МОП-емкость. Разработаны ПЗС, в которых используется емкость p - n -перехода или барьера Шотки, однако МОП-емкость используется наиболее широко, и на ее примере удобно объяснить работу ПЗС. На рис. 1.1 изображена МОП-емкость, сформированная на полупроводнике p -типа (p -тип рассматривается как пример, все рассуждения применимы и к полупроводнику n -типа с соответствующими изменениями знаков). Состоит МОП-емкость из электрода, который может быть изготовлен из металла или сильнолегированного поликремния, диэлектрика и полупроводниковой подложки. Если подложкой служит монокристаллический кремний, диэлектриком в большинстве случаев является термически выращенный диоксид кремния SiO_2 . Толщина слоя оксида кремния мала, всего $0,05 \dots 0,1$ мкм, так как при большей толщине диэлектрика проникновение внешнего поля в подложку ослабляется и управление свойствами МОП-емкости становится затруднительным.

Рассмотрим поведение МОП-емкости при различных смещениях на электроде (подложка заземлена).

Идеальная МОП-емкость в термодинамическом равновесии. Она отвечает следующим условиям: при любых смещениях на электроде существуют только заряд в полупроводнике и равный ему, но противоположный по знаку за-

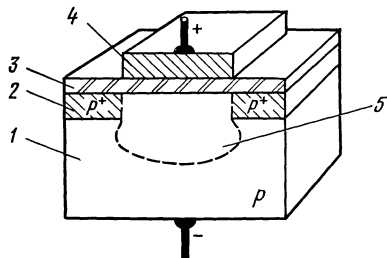


Рис. 1.1. МОП-емкость:

1 — полупроводник; 2 — стоп-канальная область; 3 — оксид; 4 — электрод; 5 — обедненная область

ряд на электроде (заряд в оксиде равен нулю); работы выхода электронов из металла (материала электродов) и полупроводника равны; отсутствует перенос носителей заряда сквозь диэлектрик (при постоянном смещении).

Следствием первых двух условий является *состояние плоских зон*: энергетические зоны полупроводника при отсутствии смещения не изгибаются у поверхности раздела (рис. 1.2,а). Реальная МОП-емкость отличается от идеальной, по крайней мере, первыми двумя условиями, но для понимания процессов, происходящих в МОП-емкости, это не столь существенно.

В полупроводнике *p*-типа с объемной концентрацией акцепторов N_A уровень Ферми находится между серединой запрещенной и верхом валентной зон (рис. 1.2,а). Потенциал Ψ_F , соответствующий уровню Ферми, равен $\Psi_F = (E_F - E_i)/q = (kT/q) \ln(N_A/n_i)$, где n_i — концентрация носителей в собственном полупроводнике; $kT/q \approx 0,026$ эВ при комнатной температуре. В ПЗС применяют обычно высокоомные подложки. Приняв удельное сопротивление кремния *p*-типа 20 Ом·см, т. е. $N_A = 6 \cdot 10^{14}$ см⁻³, получим, что $\Psi_F \approx 0,25$ В. Потенциал Ψ_F отсчитывают от середины запрещенной зоны; если уровень Ферми лежит ниже середины (*p*-тип), то $\Psi_F < 0$, если выше (*n*-тип), — $\Psi_F > 0$.

Отрицательное смещение на электроде — состояние аккумуляции или обогащения. Пусть электрод смещен относительно подложки отрицательно на некоторую величину U_g . Это означает, что на границе электрод — диэлектрик находится отрицательный заряд, а в полупроводнике индуцируется равный ему положительный заряд, образованный дырками, которые поступают в подложку из внешней цепи. Дырки мгновенно (за время порядка 10^{-12} с) собираются у границы раздела полупроводник — диэлек-

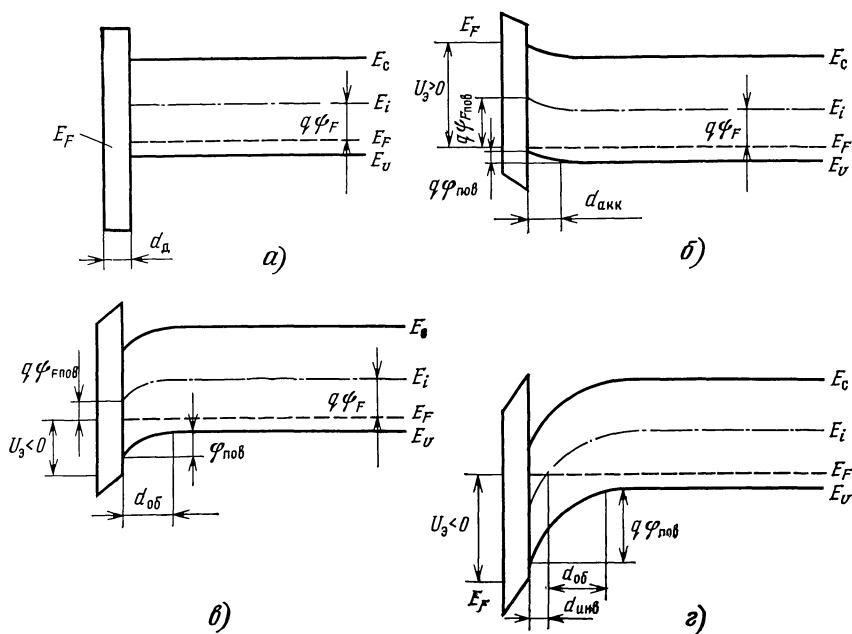


Рис. 1.2. Зонные диаграммы идеальной МОП-емкости:

а — состояние плоских зон; б — аккумуляция или обогащение; в — обеднение; г — инверсия

трик, формируя тонкий слой высокой проводимости. У поверхности полупроводник p -типа превращается в сильнообогащенный p^+ -тип. На зонной диаграмме это соответствует приближению верха валентной зоны к уровню Ферми вблизи границы раздела (рис. 1.2,б), т. е. зоны у поверхности изгибаются вверх. Изгиб зон невелик, составляет $(8 \dots 10) kT/q$, поскольку слой дырок экранирует проникновение поля вглубь подложки, и практически все падение напряжения сосредоточится в диэлектрике. Оценить параметры слоя аккумуляции можно следующим образом. Концентрация дырок у поверхности описывается выражением $p_{\text{пов}} = p \exp(|q\phi_{\text{пов}}|/kT)$, где $p_{\text{пов}}$ и p — концентрации дырок у поверхности и в глубине подложки; $\phi_{\text{пов}}$ — поверхностный потенциал $\phi_{\text{пов}} = \Psi_{F_{\text{пов}}} - \Psi_F$ (рис. 1.2,б). Потенциалы $\Psi_{F_{\text{пов}}}$ у поверхности Ψ_F в объеме отсчитываются вниз от середины запрещенной зоны. Из рис. 1.2 видно, что потенциал $\phi_{\text{пов}}$ соответствует величине изгиба зон у поверхности.

Поскольку у поверхности возникла разность потенциалов, то в полупроводнике появилось поле E_n . Предположив, что основная часть дырок находится вблизи поверхности в слое, падение напряжения в котором примерно равно kT/q , запишем $E_n d_{\text{ак}} \approx kT/q$, где $d_{\text{ак}}$ — центроида объемного заряда дырок.

Поле в полупроводнике E_n связано с полем в диэлектрике E_d соотношением $E_n \epsilon_n = E_d \epsilon_d$, где ϵ_n , ϵ_d — диэлектрические постоянные полупроводника и диэлектрика (у кремния $\epsilon_n = 12$, у оксида $\epsilon_d = 3,9$). В полупроводнике падение мало, т. е. $E_d \approx U_0/d_d$, где d_d — толщина диэлектрика. Приняв типичные значения $U_0 = -10$ В и $d_d = 10^{-5}$ см, получим $E_d \approx 10^6$ В·см $^{-1}$, а $E_n \approx 3 \cdot 10^5$ В·см $^{-1}$. Толщина слоя аккумуляции $d_{\text{ак}} = kT/qE_n \approx 0,8$ нм, т. е. слой действительно очень тонок. Эквивалентная схема МОП-емкости представляет последовательно соединенные емкость диэлектрика C_d и полупроводника C_n . В состоянии аккумуляции из-за малой толщины слоя аккумуляции емкость полупроводника гораздо больше емкости диэлектрика, т. е. общая емкость будет примерно равна $C_d = \epsilon_d \epsilon_0 / d_d$, где $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14}$ Ф·см $^{-1}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума. Если диэлектриком является слой диоксида кремния толщиной 0,1 мкм, то удельная емкость составит $C_d \approx 3,3 \cdot 10^{-8}$ Ф·см $^{-2}$. Эту величину полезно запомнить, так как она часто встречается в оценочных расчетах структур ПЗС. Удельный заряд на электроде и соответственно такой же в полупроводнике равен $Q = C_d U_0 = q p_{\text{пов}} d_{\text{ак}}$. Отсюда $p_{\text{пов}} \approx 10^{18}$ см $^{-3}$, т. е. на четыре порядка выше концентрации дырок в объеме. На рис. 1.3,а приведены распределения заряда, напряженности поля и потенциала в состоянии аккумуляции заряда для двух значений положительного смещения.

Небольшое положительное смещение — состояние обеднения. Положительный заряд на электроде оттолкнет аккумулярованные у поверхности дырки и связанный с ними изгиб зон вверх исчезнет. Зоны опустятся книзу, пройдут состояние плоских зон и прогнутся (рис. 1.2,в). Не экранируемое более дырками поле сможет проникнуть довольно глубоко в подложку. Силовые линии поля заканчиваются при этом на тех акцепторах, от которых под влиянием внешнего положительного смещения удалены во внешнюю цепь дырки. Положительный заряд на электроде равен отрицательному заряду обнажившихся акцепторов, которые образуют обедненный слой толщиной $d_{\text{об}}$. Распределение напряженности поля и потенциала в обедненном слое (одномерная задача, т. е. распределение по оси x , направленной перпендикулярно поверхности) может быть найдено из уравнения Пуассона [2] и показано на рис. 1.3,б. Поверхностный потенциал $\phi_{\text{пов}}$ равен площади треугольника на диа-

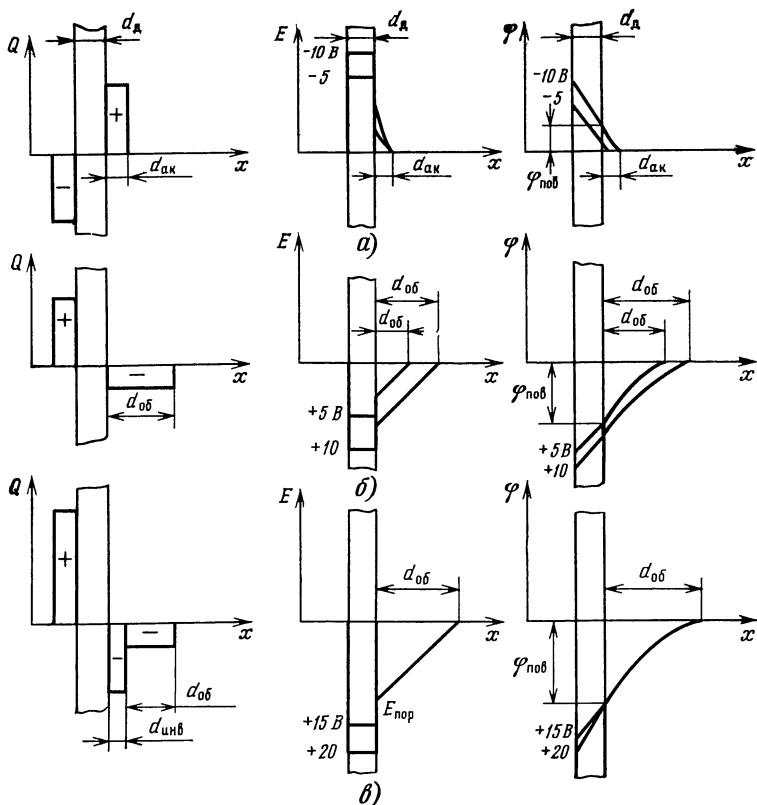


Рис. 1.3. Распределение зарядов, напряженности поля и потенциала при различных смещениях идеальной МОП-емкости в состояниях:

а — аккумуляции; б — обеднения; в — инверсии

грамме напряженности поля. Скачок напряженности поля на границе диэлектрика и полупроводника вызван различием диэлектрических постоянных ($E_n d_n = E_d d_d$). Смещение на электроде при обеднении уже не приходится почти целиком на диэлектрик, как это было при аккумуляции между диэлектриком и обедненным слоем

$$U_3 = U_d + \varphi_{пов} = E_d d_d + Q_s^2 / 2\varepsilon_n \varepsilon_0 q N_A = Q_s / C_d + Q_s / 2\varepsilon_n \varepsilon_0 q N_A. \quad (1.1)$$

Зависимость между поверхностным потенциалом и приложенным к электроду смещением имеет вид

$$U_3 = \varphi_{пов} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_n \varepsilon_0 q N_A}}{C_d} \sqrt{\varphi_{пов}} = \varphi_{пов} + K \sqrt{\varphi_{пов}}. \quad (1.2)$$

Постоянный множитель K в (1.2) часто встречается в формулах, описывающих работу ПЗС; в [2] его называют *коэффициентом влияния заряда обедненного слоя подложки* $B_{o.c.}$. Диаграммы рис. 1.3,б показывают, что с уве-

личением смещения на электроде обедненный слой расширяется, напряженность поля растет и в диэлектрике, и в полупроводнике, поверхностный потенциал также растет. В отличие от аккумуляции в состоянии обеднения нельзя пренебречь емкостью обедненного слоя в полупроводнике $C_{об}$. Полная емкость МОП-структуры в режиме обеднения поверхности основными носителями равна $C = C_d C_{об} / (C_d + C_{об})$.

Большое положительное смещение — состояние инверсии. По мере увеличения смещения энергетические зоны (рис. 1.2,г) все круче изгибаются книзу, и в какой-то момент середина запрещенной зоны совпадает с уровнем Ферми $\varphi_{пов} = \Psi_F$, а затем опустится ниже уровня Ферми $\varphi_{пов} > \Psi_F$. Это соответствует тому, что у поверхности полупроводник p -типа инвертирован в полупроводник n -типа. Объемная концентрация электронов становится сравнимой с концентрацией дырок. Подобная ситуация понятна — дырки активно отталкиваются от поверхности положительным смещением, а электроны притягиваются. Их немного, так как они неосновные носители, но за определенное время (рассматриваются установившиеся, стационарные состояния) электроны накапливаются в количестве, достаточном для инверсии. Различают *слабую* и *сильную* инверсию. Слабой инверсии соответствует условие $\varphi_{пов} = \Psi_F$, сильной $\varphi_{пов} = 2\Psi_F$. При $\varphi_{пов} = 2\Psi_F$ поверхностная концентрация неосновных носителей (электронов) равна исходной концентрации основных (дырок). В состоянии сильной инверсии концентрация электронов в приповерхностном слое резко возрастает (по экспоненте) с ростом смещения на электроде и, следовательно, поверхностного потенциала. Слой высокой концентрацией электронов напоминает слой дырок в состоянии аккумуляции. Он также препятствует проникновению поля в глубь полупроводника, падение на нем составляет $(8 \cdot 10) kT/q$, а толщина не превышает нанометра. Как видно из рис. 1.3,б, увеличение смещения выше некоторой пороговой величины, при которой сформировался слой электронов, приводит только к росту напряженности поля в оксиде, но не к изменению поля в полупроводнике и поверхностного потенциала, остающегося равным примерно $2\Psi_F$. Можно считать, что в состоянии сильной инверсии достигается максимальная толщина обедненного слоя, т. е.

$$d_{об\ max} = \sqrt{\frac{2\varphi_{пов} \varepsilon_{\pi} \varepsilon_0}{q N_A}} = \sqrt{\frac{4\varepsilon_{\pi} \varepsilon_0 kT \ln(N_A/n_i)}{q^2 N_A}}. \quad (1.3)$$

Пороговое напряжение $U_{пор}$, т. е. смещение на электроде, при котором начинается сильная инверсия, находим из (1.2)

$$U_{пор} \approx 2\Psi_F + \sqrt{2\varepsilon_{\pi} \varepsilon_0 q N_A (2\Psi_F)/C_d} = 2(kT/q) \ln(N_A/n_i) + \sqrt{4\varepsilon_{\pi} \varepsilon_0 N_A \ln(N_A/n_i) kT/C_d}. \quad (1.4)$$

В пороговом состоянии объемная концентрация электронов в приповерхностном слое точно равна концентрации дырок, т. е. $Q_{инв} = q N_A d_{инв}$, где $Q_{инв}$ и $d_{инв}$ — заряд и толщина слоя инверсии. Поскольку падение на этом слое сравнимо с kT/q (не превышает $10 kT/q$), можно записать $Q_{инв}/C_{инв} \approx kT/q$ и $q N_A d_{инв}^2 / \varepsilon_{\pi} \varepsilon_0 \approx kT/q$.

Отсюда

$$d_{инв} \approx \sqrt{\frac{kT \varepsilon_{\pi} \varepsilon_0}{q^2 N_A}} = L_D. \quad (1.5)$$

Толщина инверсионного слоя оказывается близкой к дебаевской длине дырок L_D . Полная емкость МОП-структуры в состоянии инверсии, как и в состоянии аккумуляции, должна равняться емкости оксида. Однако это выполняется в том случае, если измерения емкости проводят на частоте, достаточно низкой для того, чтобы электроды успели образовать приповерхностный инверсионный слой. При высокочастотных измерениях определяющей является емкость обедненного слоя в полупроводнике C_n , толщина которого достигает максимума и перестает зависеть от смещения.

Реальная МОП-емкость в термодинамическом равновесии. В реальных кремниевых МОП-структурах наблюдаются некоторые отличия от рассмотренных закономерностей, обусловленные двумя причинами: существованием поверхностных ловушек и зарядов в оксиде (рис. 1.4) и различием в работах выхода электрона из металла (или поликремния) и полупроводника.

Поверхностные ловушки возникают из-за того, что граница раздела оксид—кремний является нарушением пространственной периодичности кристаллической решетки кремния. На границе появляются оборванные связи, кроме того, при термическом окислении на два атома кислорода требуется только один атом кремния, так что избыточный кремний может вызвать появление энергетических уровней в запрещенной зоне. Поверхностные состояния могут быстро перезаряжаться, обмениваясь носителями заряда с кремнием (поэтому их называют *быстрыми состояниями*). Плотность поверхностных состояний зависит от метода окисления и может быть значительно снижена обработкой в водороде, заполняющем оборванные связи. Для примера, плотность поверхностных состояний у лучших образцов ПЗС лежит в диапазоне $10^{-9} \dots 10^{-10} \text{ см}^{-2}$.

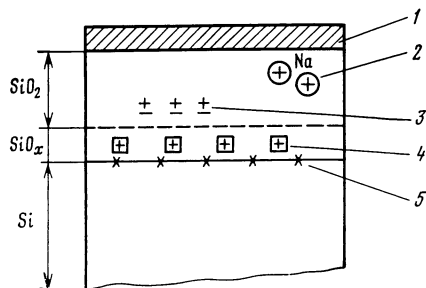


Рис. 1.4. Заряды в термическом оксиде:

1 — электрод; 2 — заряд подвижных ионов, 3 — заряд, захваченный в оксиде; 4 — фиксированный заряд оксида, 5 — заряд, захваченный поверхностными ловушками

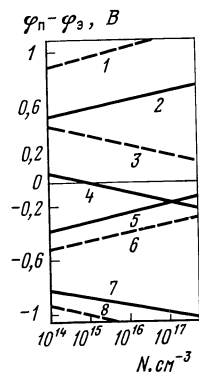


Рис. 1.5. Зависимость разности работ выхода из полупроводника φ_p и электрода φ_a от концентрации примеси в подложке для МОП-структур с различными электродами:

1 — p^+ -поликремний (n -кремний); 2 — золото (n -кремний); 3 — p^+ -поликремний (n -кремний); 4 — золото (p -кремний); 5 — алюминий (n -кремний); 6 — n^+ -поликремний (n -кремний); 7 — алюминий (p -кремний); 8 — n^+ -поликремний (p -кремний)

Это означает, что на миллион атомов границы раздела приходится один захваченный заряд. Тем не менее с этим приходится считаться.

Заряды в оксиде делятся на три группы: фиксированный заряд оксида; заряд, захваченный в оксиде; заряд подвижных ионов. Фиксированный заряд оксида расположен на границе раздела оксид — кремний и в непосредственной близости от нее, в слое толщиной 3 ... 4 нм. Возникновение фиксированного заряда обычно связывают с тем, что на границе раздела вырастает не диоксид кремния, а слой нестехиометрического оксида состава SiO_x , где $x < 2$ (для стехиометрического оксида $x=2$). В этом слое существуют избыточные положительные ионы трехвалентного кремния и несвязанного, потерявшего один электрон иона кислорода, так что фиксированный заряд в большинстве случаев положителен. Величина заряда практически не зависит от изменения поверхностного потенциала, толщины оксида, типа проводимости и концентрации легирующей примеси в подложке, но зависит от ориентации подложки и технологических режимов окисления и отжига. К слою нестехиометрического оксида примыкает слой SiO_2 , характеризующийся большими внутренними механическими напряжениями. В этом слое захватывается заряд, возникающий при внешних воздействиях, например при рентгеновском облучении или инжекции в оксид горячих электронов. Впрочем, захваченный заряд может распределяться более или менее равномерно по всей толщине оксида.

Подвижный заряд оксида обычно приписывают ионам щелочных металлов, таких, как натрий и калий, практически всегда присутствующих в термически выращенном оксиде.

Термодинамическая работа выхода электрона из полупроводника равна $\Phi_n = \chi + \Delta E/2q - \Psi_F$, где χ — сродство электрона к полупроводнику (для кремния 4,15 В); $\Delta E/2q$ — полуширина запрещенной зоны (для кремния 0,55 В). Последняя составляющая зависит от концентрации примеси. Для кремния p -типа с концентрацией акцепторов $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ работа выхода равна $4,1 + 0,55 + 0,25 = 4,95$ В. Работа выхода электрона из металлов Φ_m равна 3,2 (магний) ... 5,1 В (золото), для алюминия она равна 4,1 В. У широко применяемого поликремния работа выхода электрона зависит от типа легирующей примеси. Для поликремниевого электрода n^+ -типа, где уровень Ферми практически совпадает с положением дна зоны проводимости, эффективная работа выхода равна значению сродства электрона к кремнию, т. е. 4,15 В. В поликремниевом электроде p^+ -типа уровень Ферми лежит у потолка валентной зоны, и

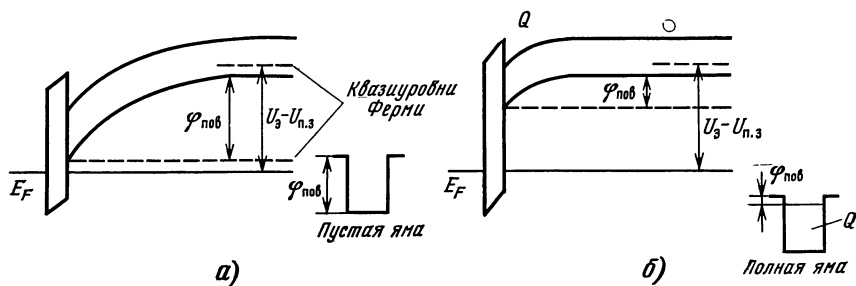


Рис. 1.6. Зонные диаграммы МОП-структуры:

а — изгиб зон в состоянии глубокого обеднения (пустая яма); б — изгиб зон в состоянии заполненной ямы

эффективная работа выхода равна $\chi + \Delta E/2q = 5,25$ В. На рис. 1.5 приведены зависимости разности работ выхода из материала электрода и полупроводника для разных уровней и типа легирования кремния, а также для различных электродов из металла и сильнолегированного поликремния [3]. Видно, что разность работ выхода варьируется в пределах $-1 \dots 1$ В, и ее надо учитывать наряду с влиянием заряда поверхностных ловушек и оксида.

Совместное влияние контактной разности потенциалов $\varphi_{к.р.п}$ и зарядов, захваченных поверхностными ловушками и оксидом, приводит к тому, что у реальной МОП-емкости при нулевом смещении зоны у поверхности не плоские, а изогнутые. Оценкой степени неидеальности служит *напряжение плоских зон* $U_{п.з}$ (рис. 1.6), т. е. то напряжение, которое надо подать на электрод, чтобы зоны у поверхности стали плоскими. Все написанные ранее выражения остаются справедливыми для эффективного напряжения на электроде $U'_э = U_э - U_{п.з}$. Выражения (1.1) и (1.2), например, изменяются следующим образом:

$$U_э - U_{п.з} = U'_э = Q_э/C_d + \varphi_{пов}; \quad (1.6)$$

$$U_э - U_{п.з} = U'_э = \varphi_{пов} + K\sqrt{\varphi_{пов}}. \quad (1.7)$$

В свою очередь, $U_{п.з} = (Q_{пов} + Q_d)/C_d + \varphi_{к.р.п}$, где $Q_{пов}$ и Q_d — заряды поверхностных ловушек и оксида при $\varphi_{п} = 0$.

Реальная МОП-емкость в нестационарном состоянии. В состоянии сильной инверсии приповерхностный слой электронов формируется не сразу (в отличие от слоя дырок при аккумуляции). И это понятно: от внешней цепи он изолирован обедненным слоем и единственными источниками его пополнения служат процессы генерации носителей на поверхности и в объеме полупроводника. От момента подачи на электрод смещения, вызывающего в состоянии равновесия сильную инверсию, и до момента формирования инверсионного слоя МОП-емкость находится в нестационарном состоянии. Зонная диаграмма для такого состояния показана на рис. 1.6,а. У поверхности зоны сильно опущены вниз, поверхностный потенциал $\varphi_{пов}$ велик. В приповерхностной области образуется *потенциальная яма* для электронов, МОП-емкость находится в состоянии, которое можно назвать *глубоким обеднением*. Это состояние является продолжением обеднения при напряжениях выше порогового в условиях, когда электроны у поверхности еще не накопились, и инверсия не наступает. Положительный заряд на электроде компенсируют только поляризованные акцепторы обедненного слоя, на котором падает основная часть приложенного смещения. В полупроводнике при температурах, отличных от абсолютного нуля, идут процессы генерации электронно-дырочных пар. Пары разделяются полем в обедненном слое, и электроны скатываются в потенциальную яму у поверхности. По мере того как электроны накапливаются у поверхности, они экранируют поле, и все большая часть напряжения падает на диэлектрике. Это означает, что изгиб зон и поверхностный потенциал уменьшаются, соответственно уменьшается толщина обедненного слоя. По истечении некоторого времени, называемого *временем релаксации*, наступит равновесное состояние, при котором у поверхности появляется инверсионный слой толщиной около 1 нм, а поверхностный потенциал уменьшится до $\varphi_{пов} \approx 2\psi_F$. Потенциальная яма при этом перестанет существовать, ее заполнили электроны (рис. 1.6,б), которые следует признать *паразитными*, ибо они несут информацию лишь о процессах тепловой генерации, т. е. о температуре полупроводника и степени совершен-

ства кристаллической решетки у границы раздела. Однако в течение отрезка времени, меньшего, чем время релаксации, потенциальную яму можно заполнить электронами, представляющими полезную информацию. В ФПЗС, например, ими являются электроны, генерируемые под действием света в количестве, пропорциональном количеству поглощенных фотонов.

В любом ПЗС используется нестационарное состояние МОП-емкости, смещенной в область глубокого обеднения, причем максимальное время использования определяется темпом конкурентного паразитного процесса тепловой генерации. Такая генерация происходит в объеме полупроводника и на границе раздела диэлектрик — полупроводник. В кремнии объемная генерация в основном наблюдается в обедненном слое и обусловлена ловушками с энергетическими уровнями, лежащими вблизи середины запрещенной зоны. Скорость генерации пропорциональна плотности ловушек, их сечению захвата и тепловой скорости электронов. Сечение захвата у ловушек одного типа и тепловую скорость электронов можно считать постоянными (типичные значения 10^{-16} см² и 10^7 см/с), так что скорость объемной генерации в основном зависит от плотности ловушек в полупроводнике. Происхождение ловушек связано с металлическими примесями, такими, как золото, железо, медь, мало влияющими на энергетические свойства полупроводников, но резко изменяющими темп генерации. Металлы, в отличие от доноров и акцепторов, диффундируют не по узлам, а по междоузлиям кристаллической решетки, причем скорость их диффузии на много порядков выше, чем у легирующей примеси. Металлы быстро пронизывают полупроводниковую подложку, осаждаваясь преимущественно в местах нарушения кристаллической решетки и областях с высокими механическими напряжениями. Так возникают объемные ловушки, энергетические уровни которых мало отличаются: золото 0,54 (акцептор); медь 0,53 (донор); железо 0,51 эВ (акцептор), и близки к середине запрещенной зоны.

На границе раздела картина генерации примерно такая же, с той разницей, что в роли объемных ловушек выступают *быстрые поверхностные состояния* с энергиями, близкими к середине запрещенной зоны. Эффективная скорость генерации равна сумме объемной и поверхностной составляющих $1/\tau_{эф} = 1/\tau_{об} + 1/\tau_{пов}$, где $\tau_{эф}$, $\tau_{об}$ и $\tau_{пов}$ — эффективное, объемное и поверхностное время жизни соответственно. Время релаксации связано с эффективным временем жизни соотношением $t_{рел} \approx (N_A/n_i)\tau_{эф}$. Для типичных уровней легирования $t_{рел} \approx 10^8 \tau_{эф}$.

Помимо генерации, электроны доставляются диффузионным током из нейтрального объема полупроводника, однако эта составляющая мала, и при комнатной температуре ею пренебрегают. Современная технология кремниевых МОП-структур обеспечивает значение эффективного времени жизни 100 мкс ... 1 мс. Это означает, что время релаксации качественной МОП-емкости достигает 10 ... 100 с. Если допустить, что термогенерированные носители заполняют десятую часть потенциальной ямы, остается большое время 1 ... 10 с, которое можно использовать для накопления или хранения информационного заряда (в вещательном телевизионном режиме время кадра равно всего 20 мс). Размещаемый в потенциальной яме информационный заряд $Q_{инф}$ называют *зарядовым пакетом*. Он может формироваться в потенциальной яме различными способами. В ФПЗС, например, заполнение ямы носителями происходит постепенно: величина зарядового пакета пропорциональна количеству носите-

лей, генерируемых поглощенными фотонами, и времени, в течение которого на электроде поддерживается обедняющее смещение. Этот процесс, играющий основную роль в ФПЗС, называется *процессом накопления* (применяется термин «время накопления»). При электрическом вводе или при переносе из ямы в яму (см § 1.2 и 1.3) время наполнения ямы носителями заряда очень мало. В данном случае говорят о времени хранения попавшего в потенциальную яму зарядового пакета.

Максимальное время накопления, как и время хранения, определяется конкурентным процессом термогенерации.

Для нестационарного состояния МОП-емкости без информационного заряда справедливо (1.6). Следует только помнить, что величина поверхностного потенциала теперь может быть гораздо большей, чем $2\psi_F$. Толщина обедненного слоя также намного превышает максимальную толщину для стационарного состояния, определяемую из (1.3). Так, для кремния p -типа с удельным сопротивлением $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ максимальная толщина обедненного слоя в стационарном состоянии равна $0,6 \text{ мкм}$, а в нестационарном достигает 7 мкм (смещение 10 В , толщина оксида $0,12 \text{ мкм}$). Если в потенциальной яме присутствует заряд $Q_{\text{инф}}$, то (1.6) дополняется членом, учитывающим его влияние

$$U'_s = U_s - U_{\text{п.з}} = \Phi_{\text{пов}} + K\sqrt{\Phi_{\text{пов}}} + Q_{\text{инф}}/C_d. \quad (1.8)$$

Решив (1.8) относительно $\Phi_{\text{пов}}$, получим

$$\Phi_{\text{пов}} = U_s'' + U_0 - (2U''U_0 + U_0^2)^{1/2}, \quad (1.9)$$

где $U''_s = U_s - U_{\text{п.з}} - Q_{\text{инф}}/C_d$; $U_0 = qN_A \epsilon_{\text{п}} \epsilon_0 / C_d$.

На рис. 1.7 приведены зависимости, иллюстрирующие соотношение (1.6) между поверхностным потенциалом и смещением на электроде (заряд отсутствует) для различных значений концентрации примеси в подложке и толщины оксида. Видно, что при одном и том же смещении на электроде можно получать разные значения поверхностного потенциала, изменяя концентрацию примеси либо толщину оксида. Например, при $U_s - U_{\text{п.з}} = 12 \text{ В}$ поверхностный потенциал равен 11 В для $N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и всего лишь 7 В для $N_A = 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

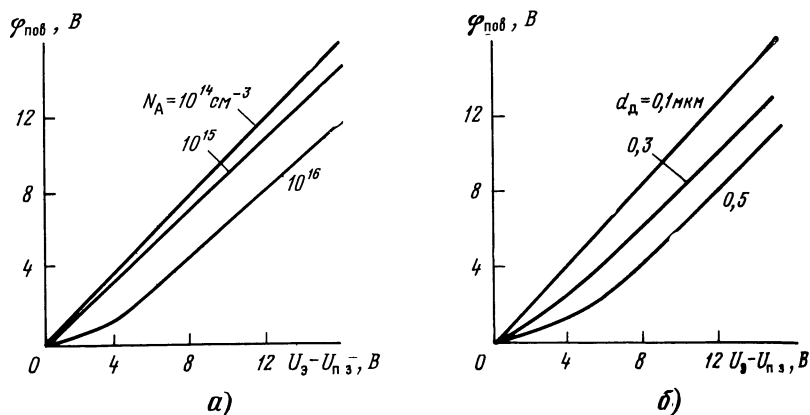


Рис. 1.7. Зависимость поверхностного потенциала от напряжения на электроде: а — от концентрации акцептора для толщины оксида $0,1 \text{ мкм}$; в — от толщины оксида для концентрации акцепторов 10^{15} см^{-3}

Отсюда становится понятным прием, широко используемый при конструировании ПЗС: для ограничения бокового расширения потенциальной ямы часть подложки под электродом сильно легируют, создавая *стоп-канальные области*. Зависимость поверхностного потенциала от величины находящегося в потенциальной яме заряда, рассчитанная по (1.9), приведена на рис. 1.8 для трех значений смещения на электроде толщины оксида 0,1 мкм и концентрации акцепторов в подложке 10^{15} см^{-3} [3]. Поверхностный потенциал практически линейно уменьшается с ростом $Q_{\text{нф}}$, пока не достигнет минимального равновесного значения $\varphi_{\text{пов}} \approx 2\varphi_{\text{р}}$.

Реальная МОП-емкость с потенциальной ямой в объеме полупроводника. В рассмотренной МОП-емкости зарядовый пакет образован поверхностными электронами, локализованными в тонком слое у поверхности раздела диэлектрик — полупроводник. Несвершенство границы раздела приводит к естественному желанию отодвинуть потенциальную яму в объем полупроводника. Выполнить это в обычной МОП-емкости нельзя, так как зависимость потенциала от глубины носит монотонный характер с максимумом у поверхности: увеличение смещения на электроде только углубляет потенциальную яму, заряд же все равно остается у поверхности. Для смещения максимума потенциала в объем было предложено создать у поверхности слой глубиной x_{pn} противоположного подложке типа проводимости [4]. Структура такой МОП-емкости показана на рис. 1.9 (штриховой линией указаны границы обедненных слоев). В подложке p -типа сформирован слой n -типа глубиной 0,5 ... 5 мкм, внутри которого образуется слой основных носителей, обычно называемый *объемным* или *скрытым каналом*. Канал соединен со стоком n^+ -типа, а от p -подложки соответственно отделен p - n -переходом. Распределение потенциала (точнее — электростатической энергии) в отсутствие смещения на электроде и стоке приведено на рис. 1.10,а; здесь φ_{pn} — встроенная разность потенциалов p - n -перехода канал — подложка. Если на электрод подать, как и для МОП-емкости, положительное смещение, потенциальная яма не образуется: основные носители электроны аккумулируются под электродом и блокируют проникновение электрического поля. Попробуем изменить картину, приложив к стоку положительное смеще-

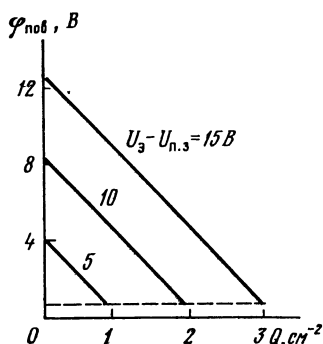


Рис. 1.8. Зависимость поверхностного потенциала от заряда в потенциальной яме и напряжения на электроде

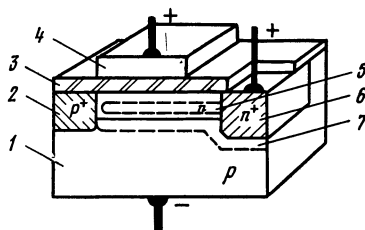


Рис. 1.9. Реальная МОП-емкость с объемным каналом:

1 — подложка; 2 — каналограничивающая область; 3 — оксид; 4 — электрод; 5 — объемный канал; 6 — область стока

ние. Сток служит контактом к каналу, и приложенное положительное напряжение смещает p - n -переход между каналом и подложкой в запиорном направлении. Объемный заряд перехода начинает расширяться как в подложку, обнажая слой акцепторов толщиной x_A , так и в n -слой, обнажая слой доноров толщиной x_{D1} . Когда смещение на стоке U_c превысит смещение на электроде U_a , приповерхностная часть канала обеднится. Положительный заряд слоя обнажившихся доноров толщиной x_{D2} будет компенсировать отрицательный заряд электрода. То, что электрод смещен положительно относительно подложки, не должно смущать: на n -слой с помощью стока задано еще большее (относительно подложки) положительное смещение, а это означает, что электрод по отношению к n -слою смещен отрицательно. На рис. 1.10,б показано распределение потенциала при $U_c = U_a$. Потенциал канала задается смещением на стоке U_c и равен $\varphi_n = U_c + \varphi_{pn}$; приближенно можно считать $\varphi_n \approx U_c$, так как обычно $U_c \gg \varphi_{pn}$. Также можно принять, что поверхностный потенциал $\varphi_{пов} \approx U_a$, так как обычно $U_a \gg U_{пз}$. При дальнейшем увеличении смещения на стоке (смещение на электроде остается фиксированным) обедненные слои со стороны поверхности и с n -стороны перехода будут расширяться (рис. 1.10,в). В какой-то момент они сомкнутся, наступит полное обеднение канала. Распределение потенциала при полном обеднении канала (рис. 1.10,г) имеет максимум φ_{max} , расположенный на расстоянии x_{max} от поверхности. Физически это обозначает, что электроны будут накапливаться не у поверхности, как в МОП-структурах без n -слоя (т. е. с поверхностным каналом), а в объеме, в области максимума: потенциальная яма глубиной φ_{max} переместилась от поверхности в объем на расстояние x_{max} . Максимум потенциала должен располагаться на таком расстоянии от поверхности, при котором заряд на электроде (с учетом заряда оксида и поверхностных состояний $Q_{пов}$) уравнивается зарядом обедненных доноров в слое толщиной x_{max} . Заряд обедненных доноров в слое толщиной $(x_{pn} - x_{max})$ уравнивается зарядом обедненных акцепторов подложки. Предполагая постоянную концентрацию доноров, получаем $Q_a = Q_{пов} + qN_{D1}x_{max}$, $qN_{D1}(x_{pn} - x_{max}) = qN_A$. Заряд обедненного слоя доноров равен $qN_{D1}x_{max} = C_d K' \sqrt{\varphi_{max} - \varphi_{пов}}$, где $K' = \sqrt{2qN_{D1}\epsilon_n\epsilon_0/C_d}$.

С учетом этого получим выражение, связывающее поверхностный потенциал со смещением на электроде (структурно оно напоминает (1.7) для МОП-структуры с поверхностным каналом, но содержит потенциал в точке максимума):

$$\varphi_{пов} = U'_a - \frac{K'^2}{2} + K' \sqrt{\varphi_{max} - U'_{max} + K'^2/4}. \quad (1.10)$$

Здесь K' коэффициент влияния заряда обедненного слоя доноров, в отли-

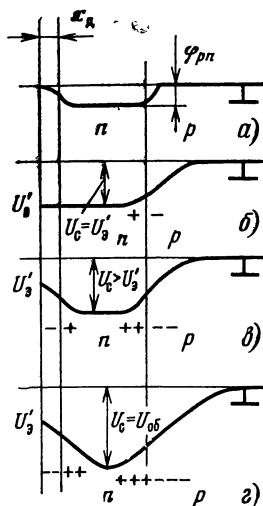


Рис. 1.10. Распределение потенциала в МОП-структуре с объемным каналом: а — отсутствует смещение на электроде и стоке; б — смещения электрода и стока равны; в — смещение на электроде больше, чем на стоке; г — состояние обеднения объемного канала

чие от аналогичного коэффициента влияния заряда акцепторов подложки в (1.7).

Смещение на стоке $U_{об}$, вызывающее обеднение канала при заданном смещении на электроде U_a , находится из упрощенного выражения (упрощение заключается в обычно выполняемом условии $N_D \gg N_A$)

$$U_{об} = qN_D x_{pn}^2 / 2\epsilon_n \epsilon_0 + qN_D x_D x_{pn} / \epsilon_n \epsilon_0 + U'_a - \varphi_{pn}. \quad (1.11)$$

Соответственно потенциал обеднения $\varphi_{об} = U_{об} + \varphi_{pn}$ (рис. 1.10,з). Дальнейшее увеличение смещения на стоке, т. е. $U_c > U_{об}$ при $U'_a = \text{const}$, приводит к расширению объемного заряда p - n -перехода в сторону подложки, в самом же канале распределение потенциала остается неизменным. Если же увеличивать смещение на электроде, не меняя на стоке, канал выйдет из состояния обеднения, и на распределении потенциала вновь появится «полка» на уровне $\varphi_k = U_c + \varphi_{pn}$ (рис. 1.10,е). Это означает уменьшение глубины потенциальной ямы, т. е. для того чтобы реализовать максимальную емкость потенциальной ямы, необходимо полностью обеднить канал. Из (1.11) можно заключить, что при фиксированном смещении на электроде $U_{об}$ связано почти линейной пропорциональной зависимостью с концентрацией примеси в канале. Глубина потенциальной ямы в объеме непосредственно совпадает с потенциалом полного обеднения канала и, следовательно, пропорциональна концентрации примеси в канале. Для МОП-емкости с поверхностной потенциальной ямой наблюдается противоположная картина: глубина ямы в первом приближении обратно пропорциональна концентрации примеси в подложке (см. рис. 1.7).

Рассмотрим, как меняется распределение потенциала в канале при изменении смещения на электроде и соблюдении условия обеднения канала. Из (1.10) следует, что с ростом U'_a поверхностный потенциал растет, но медленнее, чем U'_a , так что разность $(\varphi_{пов} - U'_a)$ уменьшается, следовательно, уменьшается x_{max} . Иными словами, глубина потенциальной ямы φ_{max} с ростом U'_a увеличивается, а сама яма приближается к поверхности (рис. 1.11,а, кривые 1, 2). При некотором значении U'_a разность $(\varphi_{max} - U'_a) = 0$ и $x_{max} = 0$: потенциальная яма располагается у поверхности полупроводника (рис. 1.11,а, кривая 3). Дальнейшее увеличение смещения на затворе приводит только к углублению потенциальной ямы (рис. 1.11,а, кривая 4). Если уменьшить U'_a от исходного, соответствующего кривой 1 на рис. 1.11,а, потенциальная яма будет удаляться от поверхности в сторону p - n -перехода (кривая 5), поверхностный потенциал будет уменьшаться, пока не станет равным $\varphi_{пов} = \varphi_{pn} - \varphi_{инв} = \varphi_{pn} - \varphi_F$; этому случаю соответствует кривая 6 на рис. 1.11,а. Далее начнется инверсия поверхности: дырки из сильнолегированных стоп-канальных областей, граничащих с n -слоем, инжектируются к поверхности и образуют тонкий инверсный слой. Этот слой блокирует проникновение поля, и изменение смещения на электроде не будет сказываться на распределении потенциала. При увеличении отрицательного смещения на электроде расти будет только падение напряжения в оксиде (отрезок 7 на рис. 1.11,а). На рис. 1.11,б приведены распределения напряженности поля для объемной потенциальной ямы (предполагается, что концентрация в n -слое постоянна). Начиная от границы с нейтральной областью подложки, напряженность поля линейно растет, достигая максимума в плоскости p - n -перехода, и затем линейно спадает (причем наклон пропорционален концентрации доноров, превращаясь в нуль в некоторой точке x_{max} , соответствующей максимуму потенциала). Далее напряженность снова линейно возрастает, но уже с противоположным знаком от точки

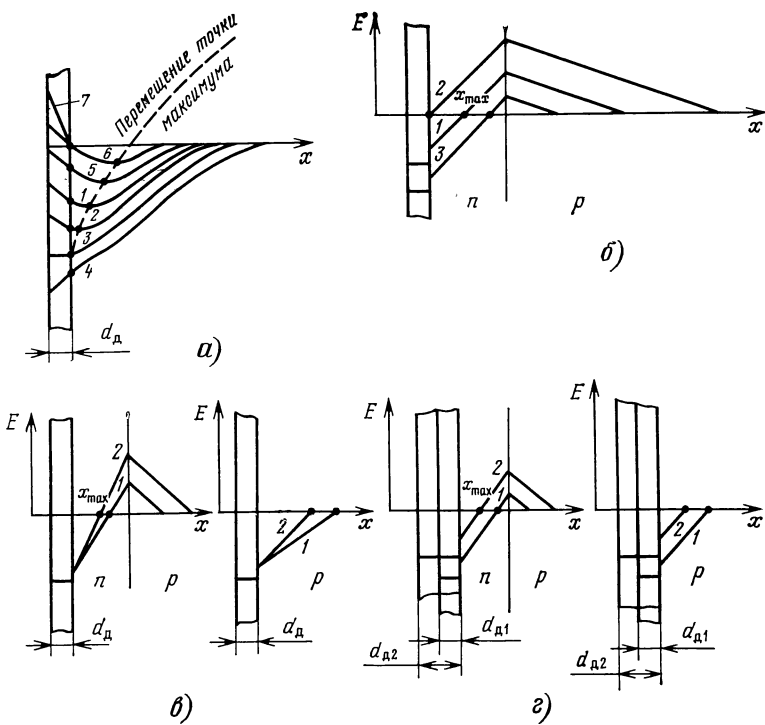


Рис. 1.11. Распределение потенциала и напряженности поля в МОП-структуре с объемным каналом:

а — изменение распределения потенциала при условии обеднения канала в зависимости от смещения на электроде (кривая 1 — исходная, кривые 2—4 соответствуют увеличению смещения, кривые 5, 6 — уменьшению, отрезок 7 показывает увеличение напряженности поля в оксиде при достижении инверсии); **б** — изменение распределения напряженности поля в зависимости от смещения на электроде; 1 — исходная кривая, кривая 2 — выход потенциальной ямы на поверхность, кривая 3 — инверсия; **в** — зависимости от концентрации доноров в канале (кривая 2 соответствует большей концентрации); **г** — зависимости от толщины диэлектрика (кривая 2 соответствует большей толщине)

x_{max} до границы полупроводник — диэлектрик, где совершает скачок, обусловленный различием диэлектрических постоянных, и остается неизменной в слое диэлектрика. На рис. 1.11,б показано, как смещается максимум при изменении смещения на электроде: кривая 2 соответствует выходу потенциальной ямы на поверхность, кривая 3 — инверсия. Рисунки 1.11,в,г демонстрируют зависимость положения потенциального максимума от концентрации доноров и толщины диэлектрика; здесь же для сравнения приведены распределения напряженности поля для поверхностной потенциальной ямы. При увеличении концентрации примеси в n -слое (кривая 2 на рис. 1.11,в) точка максимума приближается к поверхности, емкость объемной ямы возрастает. Аналогичная картина наблюдается при увеличении толщины диэлектрика (кривая 2 на рис. 1.11,г); напряженность поля с ростом толщины диэлектрика уменьшается, и точка максимума сдвигается к поверхности. Для поверхностной потенциальной ямы, наоборот, с ростом концентрации примеси в подложке и толщины диэлектрика емкость потенциальной ямы уменьшается.

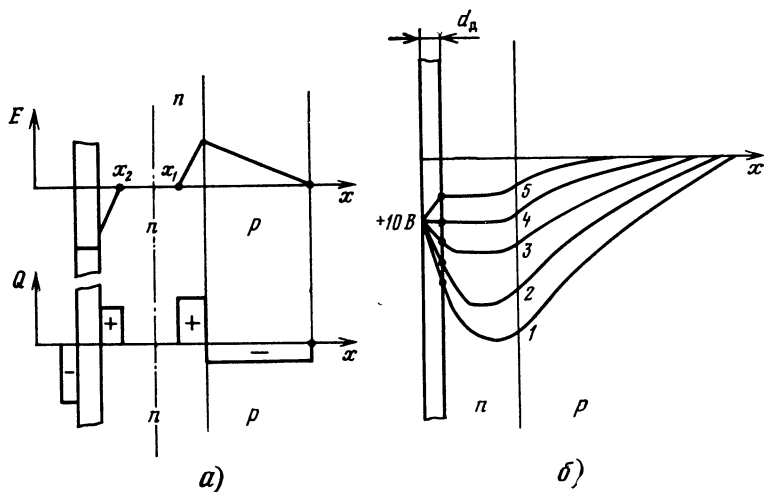


Рис. 1.12. Заряд в потенциальной яме МОП-структуры с объемным каналом: а — распределение напряженности поля и зарядов; б — распределение потенциала (при фиксированном смещении на электроде) в случае пустой ямы (кривая 1) и при заполнении ее зарядом (кривые 2—5), кривая 4 соответствует выходу заряда на поверхность, кривая 5 отражает рост поверхностной составляющей заряда

При введении в объемную потенциальную яму зарядового пакета электронов последние локализуются в области максимума потенциала на некоторой длине l и нейтрализуют здесь положительный заряд доноров. Рисунок 1.12, а иллюстрирует эту ситуацию распределениями напряженности электрического поля и зарядов. В нейтральной области напряженность поля должна быть равна нулю; протяженность области $l = x_2 - x_1$, где x_2, x_1 — границы обедненных слоев у поверхности и p - n -перехода. Величину зарядового пакета можно выразить через концентрацию доноров, акцепторов и смещения (потенциалы) [2]. Если при фиксированном смещении на электроде увеличивать зарядовый пакет, длина нейтрализованной области будет расти и для некоторой величины зарядового пакета $x_2 = 0$, т. е. заряд выйдет на поверхность. Допускать такую ситуацию нежелательно, и поэтому выход заряда на поверхность является условием, ограничивающим максимальную величину зарядового пакета. Разумно принять условие, что между зарядом и поверхностью остается некоторое минимальное расстояние x_2 (близкое к нулю) или минимальный потенциальный барьер, примерно $10 kT/q$.

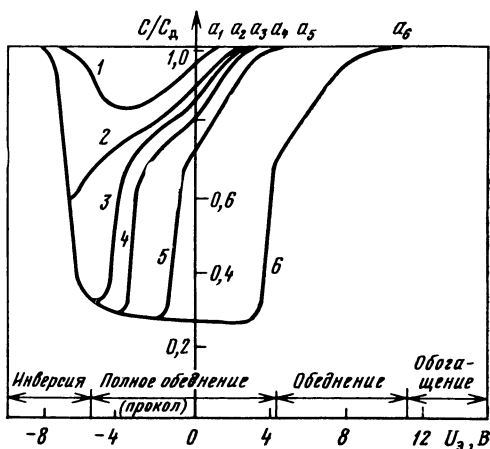
При допущении $N_D \gg N_A$ максимальный зарядовый пакет примерно равен количеству доноров в n -слое, т. е. произведению концентрации доноров на глубину p - n -перехода объемного канала ($\text{Кл} \cdot \text{см}^{-2}$)

$$Q_{\max} \approx qN_D x_{pn}. \quad (1.12)$$

На рис. 1.12, б показаны распределения потенциала для пустой ямы (кривая 1) и для заполнения ямы зарядом (кривые 2—5). Кривая 4 соответствует максимальному зарядовому пакету в объемном канале. Соответственно зарядовый пакет можно увеличивать и далее, но добавляемые электроны будут находиться в контакте с поверхностью, а объемная часть заряда, определяемая (1.12), останется почти неизменной.

Рис. 1.13. Вольт-фарадные характеристики МОП-структуры с объемным каналом n -типа при различных значениях положительного смещения на стоке (канале):

1 — смещение на стоке равно нулю; 2—6 — смещение на стоке возрастает



На рис. 1.13 приведена вольт-фарадная характеристика (ВФХ) МОП-структуры с объемным n -каналом. Если смещение на стоке $U_c = 0$, а к электроду приложено большое положительное смещение ($U'_a > 0$), у поверхности аккумулируются электроны, и емкость между электродом и подложкой будет равна емкости диэлектрика. Обеднение в этом случае возможно только при отрицательных смещениях на электроде, что видно из хода кривой 1: при $U'_a > 0$ кривая 1 совпадает с емкостью диэлектрика, и только в точке a_1 , близкой к нулю, начинает отклоняться, соответствуя уменьшению общей емкости. Уменьшение емкости объясняется последовательным включением емкостей диэлектрика и обедненного приповерхностного слоя. С увеличением отрицательного смещения на электроде общая емкость вначале падает, а затем возрастает, так как под поверхностью начинает формироваться инверсионный слой, образованный дырками, которые поступают из стоп-канальной области. В итоге общая емкость возвращается к значению емкости диэлектрика. Если на сток подать положительное смещение, точку начала обеднения можно сместить в область положительных значений напряжения на электроде (точки a_2 — a_6 на кривых 2—6 рис. 1.13), обычно применяемых в ПЗС. Рассмотрим в качестве примера кривую 6, снятую при $U_c = 10$ В. При $U'_a \approx 10$ В начинается обеднение. С дальнейшим уменьшением U'_a смещение на стоке (смещение канала) становится все более положительным по отношению к электроду или, что то же самое, электрод смещается все более отрицательно по отношению к каналу. Обедненный слой под поверхностью расширяется и при $U'_a = 4$ В достигает обедненного слоя p - n -перехода. Наступает смыкание обедненных слоев (прокол), т. е. *полное обеднение* канала. При полном обеднении емкость минимальна и слабо зависит от смещения на электроде. Это наглядно видно по слиянию нижних отрезков кривых 4—6 в области полного обеднения, которая на ВФХ представляет тот диапазон значений, где допустимо изменять смещение на электроде при заданном смещении на стоке, т. е. *рабочую емкость* ПЗС с объемным каналом.

1.2. Зарядовая связь

Изолированную МОП-емкость можно, прикладывая смещение соответствующей величины и полярности, привести в нестационарное состояние глубокого обеднения, т. е. создать потенциальную яму и осуществить процесс накопления и хранения зарядового пакета. Для передачи зарядового пакета из одной потенциальной ямы в другую необходимо сблизить МОП-емкости настолько, чтобы их электрические поля влияли друг на друга. В этом случае можно говорить о *зарядовой связи* между МОП-емкостями. Для накопления заряда и формирования зарядового пакета на МОП-емкость достаточно подать постоянное обедняющее смещение. Перенос зарядов из одной емкости в другую, связанной с нею зарядовой связью, требует переключения (тактирования) электродов. На рис. 1.14,а показаны две МОП-емкости с типичными размерами электродов 4...10 и зазоров между ними 0,2...1 мкм. На электроды подают импульсное смещение, характеризующееся периодом T и двумя уровнями: высоким (или верхним) уровнем и низким (или нижним) уровнем (рис. 1.14,б). Пусть в некоторый начальный момент на левый электрод подан импульс с высоким уровнем (10...20 В), на правый — с низким (0...10 В). Под левым электродом образовалась глубокая потенциальная яма, дно которой ниже дна правой ямы на $\Delta\varphi$, пропорциональную разности смещений высокого и низкого уровней (рис. 1.14,в). Следовательно, в левую яму можно поместить зарядовый пакет не более чем $Q \approx C_d A_0 \Delta\varphi$, где A_0 — площадь электрода. В момент t_1 производится тактирование: левый электрод переключается на низкий уровень смещения, правый — на высокий. На рис. 1.14,г приведена гипотетическая картина этого момента, когда справа подготовлена глубокая пустая яма, а носители заряда из поднявшейся левой ямы еще не начали двигаться. Вслед за этим начнется перенос, который проходит три последовательные стадии (рис. 1.14,д,е,ж), связанные с различными механизмами. В конце концов, за-

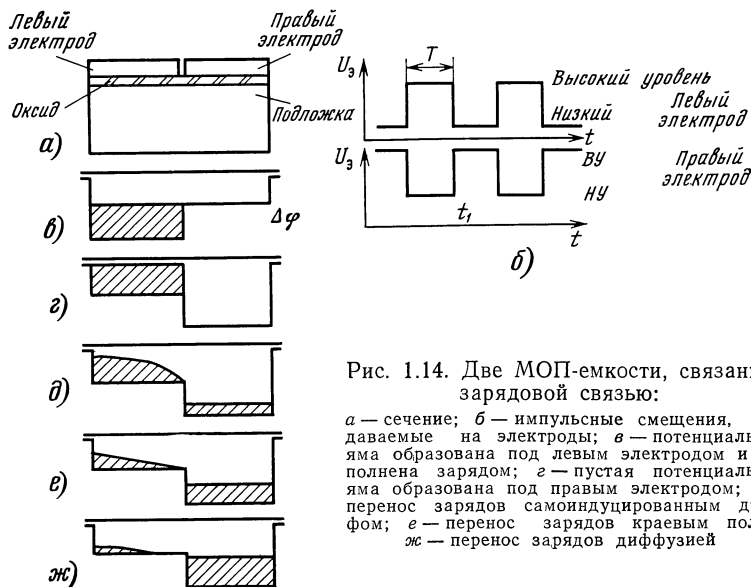


Рис. 1.14. Две МОП-емкости, связанные зарядовой связью:

а — сечение; б — импульсные смещения, подаваемые на электроды; в — потенциальная яма образована под левым электродом и заполнена зарядом; г — пустая потенциальная яма образована под правым электродом; д — перенос зарядов самондущиванным дрейфом; е — перенос зарядов краевым полем; ж — перенос зарядов диффузией

рядовой пакет оказывается под правым электродом. Перетекание заряда из ямы в яму аналогично переливу воды из одной ванны (верхней) в другую (нижнюю).

Различают три физических механизма, определяющих перенос зарядов: *самоиндуцированный дрейф, дрейф под действием краевого поля и тепловую диффузию носителей заряда*. В начальной фазе переноса, когда зарядовый пакет велик (сравним с емкостью ямы), перенос происходит просто из-за электростатического расталкивания носителей — инверсионных электронов. Как только часть носителей уходит в соседнюю яму, появляется градиент плотности заряда (рис. 114,б), возникает пропорциональное этому градиенту поле, которое вызывает ток носителей или самоиндуцированный дрейф. Величина заряда в «отдающей» левой яме уменьшается во времени по гиперболическому закону $Q_t/Q_0 = t_0/(t+t_0)$, где Q_0 , Q_t — начальный заряд и заряд в момент t ; $t_0 = \pi L_a^2 W_a C_d / 2\mu$; L_a и W_a — длина и ширина электрода (длина отсчитывается в направлении переноса); μ — подвижность носителей. Отсюда *характерная постоянная времени*, определяющая скорость переноса на этапе самоиндуцированного дрейфа, равна $t_{c\pi} = t_0(Q_0/Q_t - 1)$. Для типичных значений, входящих в t_0 величин, t_0 имеет порядок 0,1 нс. Если в момент t под «отдающим» электродом останется $Q_t = 0,1Q_0$, то $t_{c\pi} \approx 10t_0 = 1$ нс.

По мере уменьшения зарядового пакета силы расталкивания ослабевают и самоиндуцированный дрейф замедляется. Его сменяет дрейф под действием краевого поля, не зависящий от градиента плотности заряда и наличия самого заряда. Краевое поле обусловлено разностью потенциалов под соседними электродами и зависит от амплитуды тактовых импульсов, толщины слоя диэлектрика, уровня легирования и длины электродов. Точный расчет краевого поля сложен, поскольку приходится решать двумерную задачу: потенциал изменяется не только вглубь подложки, но и вдоль поверхности. Дно потенциальной ямы в отдающей МОП-емкости наклоняется в сторону вытекания заряда под углом, соответствующим напряженности краевого поля. В гидравлической аналогии это соответствует наклону верхней ванны для ускорения слива воды. Оценка напряженности краевого поля $E_{кр}$ была дана в [5, с. 46] для конкретных МОП-емкостей

$$E_{кр} \approx 6,5 \frac{x_d \Delta U'_a}{L_s^2} \left[\frac{5d_{об}/L_a}{(5d_{об}/L_a) + 1} \right]^4, \quad (1.13)$$

где $d_{об}$ — ширина обедненного слоя под центром отдающего электрода; $\Delta U'_a$ — разность смещений, приложенных к электродам. Подставив в (1.13) типичные значения, найдем, что напряженность краевого поля составляет $2 \cdot 10^3$ В·см⁻¹. Краевое поле определяет динамику переноса на последних стадиях переноса, когда оно превышает по величине самоиндуцированное поле. Практически 90...95% заряда переносится под влиянием самоиндуцированного поля. Характерная постоянная времени для этапа переноса под действием краевого поля равна $t_{кр} = L_a / 2\mu_n E_{кр}$.

После этого краевое поле перестает влиять и доминирующим механизмом переноса оставшегося весьма малого числа носителей заряда становится тепловая диффузия. Характерная постоянная времени на этом этапе равна $t_{диф} = 4L_a^2 / \pi^2 D$, где D — коэффициент диффузии носителей. Диффузионная стадия является самой медленной и поэтому определяет весь процесс переноса, так

как надо обеспечить максимально полное перемещение информационного заряда в соседнюю потенциальную яму. Для оценки полноты переноса вводят понятие *эффективность переноса* — отношение заряда, успевшего за период тактирования T перетечь под «принимающий» электрод, к величине полного заряда, находившегося под «отдающим» электродом в начале переноса $\eta = 1 - Q(T)/Q$.

Неэффективностью переноса обозначают $\epsilon = 1 - \eta$. Если неэффективность велика, значительная часть зарядового пакета отстанет, и информация искажится. Оценим допустимую неэффективность одного переноса. Предположим, что при числе переносов n допустимая потеря информации не должна превышать 10%, тогда $\epsilon = 0,1/n$. В современных линейных ФПЗС число элементов достигает 5000, а число переносов $1 \cdot 10^4$, т. е. неэффективность одного переноса должна быть менее $1 \cdot 10^{-5}$. Отсюда понятно, почему тепловая диффузия во многом определяет эффективность переноса: последние десяти- и сотысячные доли зарядового пакета попадают в соседнюю яму путем диффузии при практически полном отсутствии поля.

До сих пор рассматривался перенос инверсионных электронов, перемещающихся в зоне проводимости и не взаимодействующих с кристаллической решеткой. В такой модели переноса свободного заряда единственным ограничивающим перенос фактором является частота: чем выше частота тактирования и меньше время переноса, тем (при той же длине электрода) большая часть зарядового пакета не успеет перейти в соседнюю потенциальную яму. На практике снижение частоты не вызывает пропорционального роста эффективности переноса. Объясняется это тем, что часть электронов может переходить из зоны проводимости на уровни, расположенные внутри запрещенной зоны. Поскольку МОП-емкость находится в состоянии глубокого обеднения, дырок, которые могли бы рекомбинировать с электронами, на этих уровнях практически нет. Уровни, захватившие инверсионные электроны, через некоторое время освободят их, и электроны смогут снова вернуться в зону проводимости. Если эмиссия происходит в момент, когда перенос еще не окончен, электроны присоединятся к информационному зарядовому пакету, и задержка не повлияет на эффективность переноса. В противном случае электроны отстанут от своего зарядового пакета точно так же, как и при увеличении частоты в модели свободного переноса. Физически *центры захвата электронов* (ловушки) существуют как на границе раздела, так и в объеме полупроводника. Сравнивая их, можно отметить следующее:

плотность поверхностных ловушек минимум на два порядка выше плотности объемных (плотность поверхностных ловушек обычно обозначают в см^{-2} , объемных — в см^{-3}). Типичные значения: для поверхностных ловушек $10^9 \dots 10^{10} \text{ см}^{-2}$, для объемных $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Для сравнения можно плотность поверхностных ловушек разделить на глубину потенциальной ямы (10^{-3} см), получив условную объемную плотность поверхностных ловушек, равную $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$;

поверхностные ловушки эмиттируют захваченные электроны равномерно в широком спектре частот, для объемных ловушек процесс возврата дискретен, т. е. существует несколько видов объемных ловушек с различными временами захвата.

Характер переноса зависят и от формы управляющих импульсов. В рассмотренном примере переноса учитывались только верхний и нижний уровни

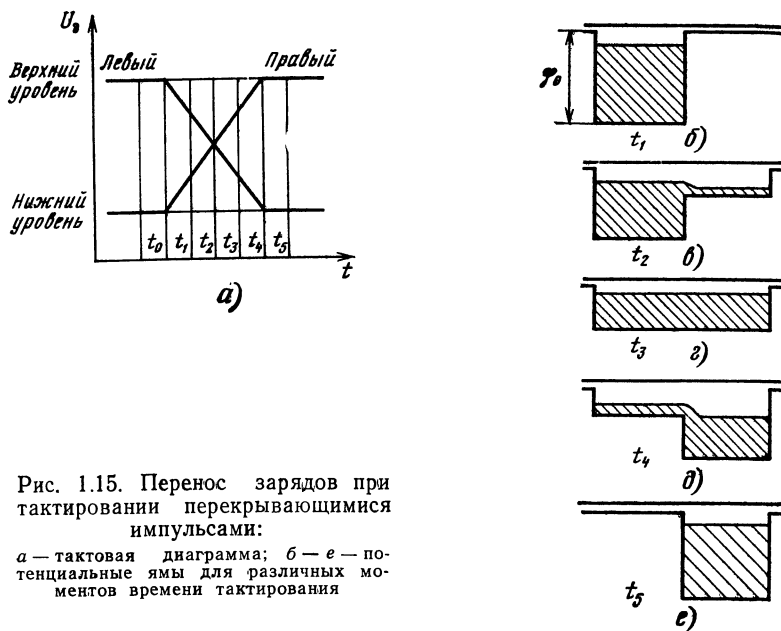


Рис. 1.15. Перенос зарядов при тактировании перекрывающимися импульсами:

а — тактовая диаграмма; *б* — *е* — потенциальные ямы для различных моментов времени тактирования

тактирующих импульсов. В то же время важную роль играет перекрытие импульсов. Тактирование связанных зарядовой связью МОП-емкостей перекрывающимися импульсами трапецидальной формы поясняет рис. 1.15, на котором изображены соответствующие *потенциальные* и *тактовые диаграммы*. Для упрощения на рис. 1.15 принята равная длительность фронта и спада, хотя на практике фронт стараются сделать короче, нежели спад. Пусть в момент t_0 на левый электрод подан, как и в предыдущем примере, импульс с высоким уровнем, на правый — с низким (рис. 1.15,а). Причем под правым электродом потенциальная яма может вообще отсутствовать, в отличие от управления перекрывающимися импульсами. В потенциальной яме под левым электродом находится заряд $Q = C_d A_0 \phi_0$, где ϕ_0 — глубина ямы (рис. 1.15,б). В момент t_1 производится тактирование, смещение на левой яме начинает падать, на правой — расти. На рис. 1.15,б—е последовательно показаны потенциальные диаграммы для различных моментов t_2 — t_5 (отмечены на тактовой диаграмме рис. 1.15,а) периода нарастания — спада импульсов. В момент t_2 глубина левой ямы уменьшилась, под правым электродом образовалась еще неглубокая потенциальная яма, в которую перетекает заряд из левой ямы (рис. 1.15,в). При равных смещениях на электродах (момент t_3) глубины обеих ям сравниваются. Заряд разольется по левой и правой яме поровну, установится общий уровень потенциала (рис. 1.15,г). Далее глубина левой ямы начнет превышать глубину правой, оставшаяся часть зарядового пакета будет перетекать из левой ямы в правую (момент t_4 , рис. 1.15,д). Наконец, в момент окончания фазы перекрытия t_5 левая яма исчезнет, зарядовый пакет окажется в правой яме (рис. 1.15,е), и потенциальная яма станет похожей на исходную с той разницей, что заряды перенесены из левой ямы в правую.

1.3. Сдвиговый регистр с зарядовой связью

Зная, как происходит накопление заряда в МОП-емкости и перенос зарядового пакета между двумя МОП-емкостями, связанными зарядовой связью, нетрудно перейти к более сложному устройству — цепочке из многих связанных МОП-емкостей, т. е. сдвиговому ПЗС-регистру. На рис. 1.16 изображена структура сдвигового регистра, каждый элемент которого образован тремя электродами. В свою очередь, одноименные электроды всех элементов электрически соединены шинами, образуя фазовые электродные системы (упрощенно — фазы). В данном примере фаз три и сдвиговый регистр называют трехфазным, в общем случае число фаз может составлять 1, 2, 3 и более.

Пусть в такой трехфазной системе высокий уровень смещения подан на вторую фазу, на первой и третьей фазах низкий уровень (рис. 1.16, а). Когда под электродами второй фазы накопятся зарядовые пакеты, высокий уровень

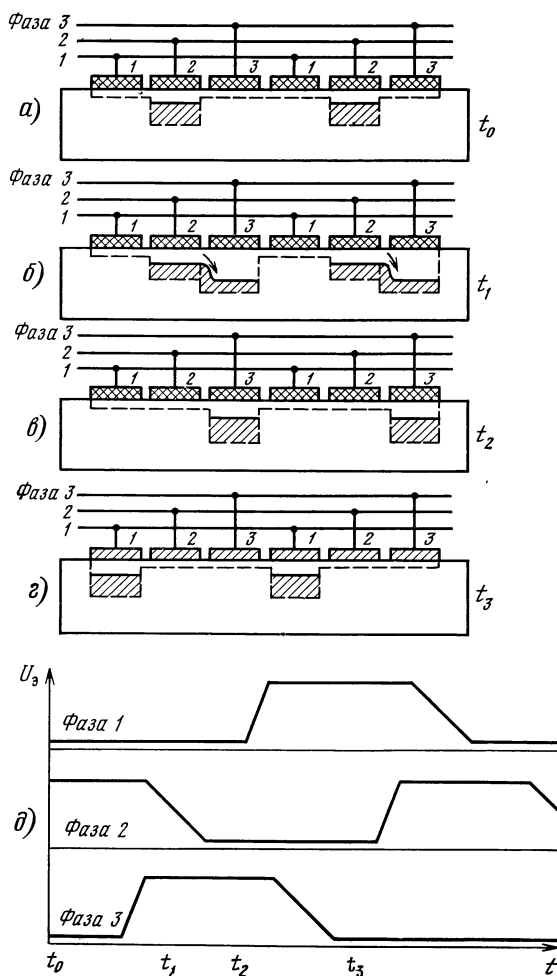


Рис. 1.16. Процесс накопления и переноса зарядов в трехфазном ПЗС-регистре:

а — зарядовые пакеты накоплены под электродами фазы 2; б — под электродами принимающей фазы 3 образовались потенциальные ямы, в них переходят зарядовые пакеты из-под электродов отдающей фазы 2; в — закончился перенос зарядовых пакетов; г — после повторения операций б, в для фаз 3 и 1, зарядовые пакеты переместились дальше вправо, под электроды фазы 1; д — тактовая диаграмма

смещения на ней переключают на низкий. Одновременно высокий уровень смещения подается на одну из соседних фаз, например на третью, расположенную справа. Заряды перетекут в пустые ямы справа. Налево они двигаться не будут, так как на электродах первой фазы смещение оставлено на низком уровне (рис. 1.16,б). На рис. 1.16,в видно, что перенос зарядовых пакетов вправо произойдет одновременно во всех элементах сдвигового регистра. Далее высокий уровень смещения с третьей фазы переключается на первую фазу, и все заряды одновременно перенесутся еще на один шаг (рис. 1.16,г), затем с первой фазы на вторую и т. д. Последовательная смена смещений на фазах, т. е. тактовая диаграмма сдвигового регистра, приведена на рис. 1.16,д.

Трехфазный сдвиговый регистр характеризуется простейшей структурой. Диэлектрик имеет одинаковую под всеми электродами толщину, подложка однородно легирована при поверхностном канале переноса, если же используется объемный канал, то распределение примеси в нем также однородно. Технология такого ПЗС-регистра соответственно является наименее сложной. За простую конструкцию и технологию приходится, однако, платить довольно сложным управлением — схемотехнически трехфазную тактовую диаграмму реализовать не просто. Если фазовые импульсы не будут определенным образом перекрываться, возможно ухудшение эффективности переноса. Например, при очень коротком спаде импульса на отдающем электроде дно потенциальной ямы будет подниматься быстрее, нежели успеют вытечь все носители заряда. В результате остатки зарядового пакета могут инжектироваться в подложку (где они рекомбинируют) или даже перетечь в обратном направлении. Упростить тактовую диаграмму при сохранении простой конструкции удастся в четырехфазном сдвиговом ПЗС-регистре (рис. 1.17,а). Тактовая диаграмма такого регистра формируется проще, так как требования к фронту и спаду и перекрытию импульсов предельно смягчены. Тактовая диаграмма (рис. 1.17,б) по виду похожа на диаграмму трехфазного регистра, но ее практически легче выполнить с помощью двух мультивибраторов. Для управления нужны четыре

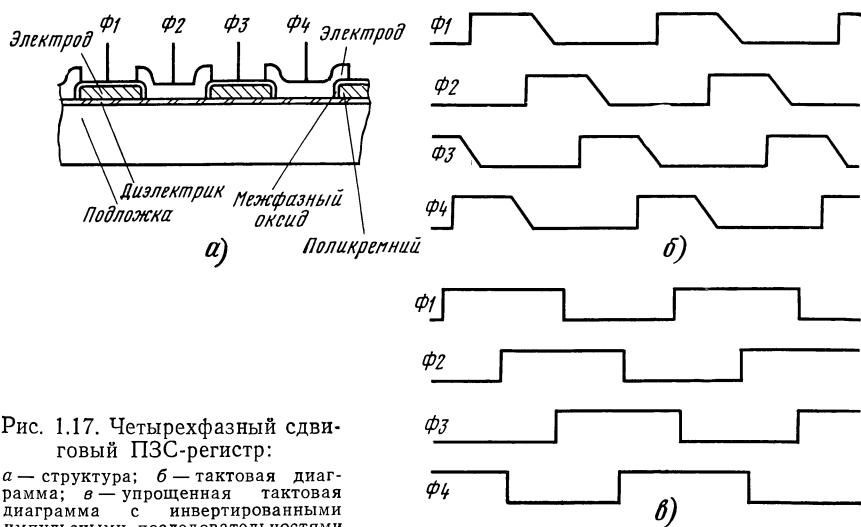


Рис. 1.17. Четырехфазный сдвиговый ПЗС-регистр:

а — структура; б — тактовая диаграмма; в — упрощенная тактовая диаграмма с инвертированными импульсными последовательностями

последовательности импульсов, хотя $\Phi 3$ и $\Phi 4$ могут быть просто инвертированными фазами $\Phi 1$ и $\Phi 2$ (рис. 1.17, в).

Рассмотренные конструкции сдвиговых регистров объединяет общая черта: направленность переноса в них обеспечивается *индуцированными потенциальными барьерами*, которые образуются в каждом элементе со стороны, противоположной направлению переноса. Индуцированный потенциальный барьер создается путем внешнего переключения, что и объясняет усложненность тактовых диаграмм.

Альтернативу представляет конструкция ПЗС-регистра со *встроенными потенциальными барьерами*, т. е. барьерами, создаваемыми технологическими способами. Асимметричное распределение потенциала можно получить неоднородным распределением примеси под электродами либо изменением толщины диэлектрика. При изготовлении четырехфазных сдвиговых регистров с поликремниевыми электродами, например, удобно толщину оксида под электродами, сформированными во втором слое, сделать большей, чем под электродами первого слоя. В результате под электродами второго слоя возникнут потенциальные барьеры (при поверхностном канале, объемном канале, наоборот — потенциальные ямы большей глубины), и отпадет необходимость подавать разное смещение на соседние электроды первого и второго слоев. Сдвиговый регистр из четырехфазного превращается в двухфазный, а пары соседних электродов объединяются в одну из двух фазовых систем (рис. 1.18, а). Электроды каждой пары, как правило, имеют различную длину. *Электрод хранения* (над потенциальной ямой) делают длиннее, чем *барьерный электрод* или *электрод переноса* (над потенциальным барьером), увеличивая тем самым зарядовую

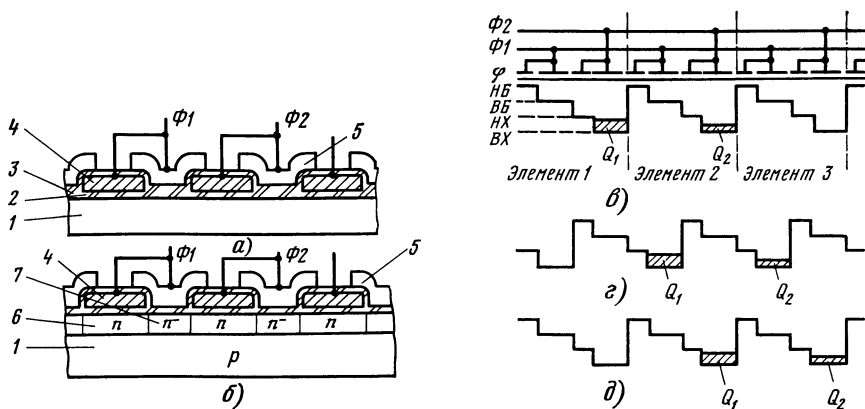


Рис. 1.18. Двухфазный сдвиговый ПЗС-регистр:

а — структура с диэлектриком разной толщины (1 — подложка, 2 и 3 — подзатворный диэлектрик, 4 и 5 — электроды в первом и втором слоях диэлектрика); б — структура со встроенными потенциальными барьерами; 6 и 7 — область хранения и потенциальный барьер; в — электроды, совмещенные с потенциальной диаграммой; г, д — перемещение зарядовых пакетов при тактировании фаз

емкость потенциальных ям. Длина барьерного электрода может быть минимальной, но все же достаточной для того, чтобы потенциальный барьер не снижался из-за влияния краевых полей соседних электродов. Более гибким и поэтому широко распространенным способом создания встроенной асимметрии является *ионное легирование*, с помощью которого формируют под барьерными электродами области с повышенной (поверхностный канал) или пониженной (объемный канал) концентрацией примеси. Ионное легирование позволяет создавать потенциальный барьер большей высоты, нежели способ использования различающейся толщины диэлектрика. Кроме того, ионное легирование удобнее в технологическом отношении. Использование ионного легирования дает возможность при необходимости ослаблять зависимость высоты потенциального барьера от смещения на электроде. Это достигается, когда основная часть примеси сконцентрирована на границе раздела оксид — полупроводник.

Рассмотрим работу двухфазного ПЗС-регистра с ионно-имплантированными барьерами (рис. 1.18,б). Смещение на фазах изменяется от высокого до низкого уровня. Поверхностный потенциал из-за разной концентрации примеси под электродами хранения и барьерными электродами будет при этом характеризоваться четырьмя уровнями, как показано на диаграмме рис. 1.18,в: высоким и низким уровнями хранения V_X и N_X ; высоким и низким барьерными уровнями V_B и N_B . В потенциальных ямах электродов хранения уместится зарядовый пакет, максимальная величина которого может быть оценена выражением $Q_{\max} \approx A_x C_d (\phi_{VX} - \phi_{BV}) \approx A_x C_d (\phi_{NX} - \phi_{NB})$, где A_x — площадь электрода хранения; ϕ_{VX} , ϕ_{BV} , ϕ_{NX} , ϕ_{NB} — высокий и низкий уровни поверхностного потенциала под электродами хранения и барьерными соответственно.

При тактировании фаз зарядовые пакеты будут перемещаться слева направо, так как с каждым электродом хранения соединен барьерный электрод, расположенный слева. Для смены направления переноса необходимо переделать конструкцию ПЗС: с помощью новых фотошаблонов соединить с электродами хранения правые барьерные электроды (напомним, что в трехфазном ПЗС для изменения направления переноса достаточно изменить тактовую диаграмму). Выделим два элемента (1 и 2), в которых находятся различные по величине зарядовые пакеты Q_1 и Q_2 . Зарядовые пакеты будут перемещаться в наиболее глубоких потенциальных ямах, в данном случае под электродами хранения фазы Φ_1 , на которую подано смещение высокого уровня. Фаза Φ_2 в это время находится под смещением низкого уровня, и потенциальный рельеф, образованный под нею, предохраняет от смешивания зарядовые пакеты, хранящиеся под фазой Φ_1 (рис. 1.18,в). При переключении высокого уровня с Φ_1 в Φ_2 распределение потенциала будет соответствовать изображенному (рис. 1.18,г). Наиболее глубокие потенциальные ямы теперь образуются под электродами хранения фазы Φ_2 , и в них перетекут заряды Q_1 и Q_2 . Последую-

щее переключение фаз восстановит потенциальную диаграмму рис. 1.18,в, однако заряд Q_1 уже перейдет из элемента 1 в элемент 2, а заряд Q_2 — из элемента 2 в элемент 3 и т. д. (рис. 1.18,д).

В двухфазном ПЗС-регистре одну из фаз можно не тактировать, а поддерживать при постоянном смещении, величина которого находится посередине между высоким и низким уровнями импульсного смещения второй фазы. Такой режим работы называют *полуторафазным* или *однофазным*. Распределение поверхностного потенциала под фазой с постоянным смещением не меняется, а под тактируемой фазой потенциальная ступенька оказывается то ниже (высокий уровень), позволяя зарядовым пакетам перетекать, то выше (низкий уровень), разделяя зарядовые пакеты. При этом амплитуда импульсов тактируемой фазы должна быть почти в 2 раза больше, чем в случае двухфазного режима, т. е. приходится выбирать между простотой управления и неприятностями, связанными с большими импульсными напряжениями (увеличение рассеиваемой мощности, опасность пробоя и др.). Помимо простого управления, однофазный режим отличается достоинствами, реализуемыми в ПЗС с объемным каналом. В ПЗС с объемным каналом: во-первых, даже при нулевом смещении на электроде существует потенциальная яма с глубиной, примерно равной напряжению обеднения канала; во-вторых, заряд не выходит из объема на поверхность. Это означает, что смещение на постоянной фазе можно сделать равным нулю, т. е. попросту соединить фазу с подложкой. Кроме того, отпадает необходимость в диэлектрике — фаза может быть сформирована непосредственно в полупроводнике. Практическим воплощением двух таких возможностей явились весьма перспективные *ПЗС с виртуальной фазой* (см. гл. 2 и 3).

Каналы переноса классифицируют по признаку локализации канала в перпендикулярном поверхности подложки направлении:

поверхностный канал расположен у границы диэлектрик — подложка. Достоинства — простота технологии, высокая зарядовая емкость. Недостатки — малое быстродействие, низкая эффективность переноса, большие шумы;

мелкий объемный канал локализован в подложке на глубине примерно 0,2 мкм. Достоинства — сравнительно большая, но меньшая, чем у поверхностного канала, зарядовая емкость, высокая эффективность переноса. Недостатки — сравнительно невысокое быстродействие, усложнение технологии в сравнении с поверхностным каналом;

глубокий объемный канал (глубина до 5 мкм, оптимально — половина длины электрода) увеличивает быстродействие из-за больших краевых полей. Недостаток — малая зарядовая емкость;

перистальтический канал [2, с. 152] состоит из мелкого канала с высокой степенью легирования, под которым находится глубокий канал с меньшей степенью легирования. Это позволяет достигать оптимальное сочетание быстродействия и зарядовой емкости. Остатки зарядового пакета как бы «ныряют» вглубь под-

ложки, куда смещается потенциальный минимум и где краевые поля больше. Недостаток — дальнейшее усложнение технологии;

многоканальные структуры содержат не один, а два и более каналов переноса, расположенных друг под другом, причем по соседним каналам переносятся носители противоположного знака, а управление каналами осуществляется с помощью общей системы фазовых электродов [2, с. 164]. Сложны в изготовлении, но позволяют расширить функциональные возможности ПЗС-регистров.

В канале любого из перечисленных типов для осуществления направленного переноса необходимо создать вдоль-канала ступенчатое распределение потенциала, которое можно сформировать не только изменением концентрации примеси или толщины диэлектрика. В [6, с. 4] описан ПЗС-регистр с объемным каналом, в котором для создания потенциальных барьеров использован *эффект узкого канала*. Электроды переноса состоят из широкой части, под которой хранится зарядовый пакет, и узкой барьерной части. В узкой части пороговое напряжение оказывается на несколько вольт больше, чем в хранящей части. К достоинствам подобной конструкции относятся не только возможность отказа от операции прецизионного легирования и замены ее фотолитографией, но и увеличение чувствительности в синей области спектра из-за большой части незакрытой поликремниевым затвором площади фотоячейки.

Оригинальной модификацией канала переноса является *меандровый канал*. В обычном ПЗС-регистре канал переноса ограничен прямыми стоп-канальными областями, а фазовые электроды выполнены в виде *Ш*-образных структур, т. е. имеют сложную конфигурацию. В меандровом канале, наоборот, фазовые электроды представляют собой две прямые шины (двухфазная система), а каналоограничивающие области имеют *Ш*-образную форму, из-за чего канал переноса становится извилистым.

Предложен [5, с. 323] тип канала, в котором перенос заряда происходит не в результате тактирования фазовых электродов, а как следствие дрейфа под действием созданного в канале поля. Над каналом располагают резистивный электрод (поликремниевую шину), на концах которого поддерживают разность потенциалов. Падение напряжения на резистивной шине вызывает переменное по напряженности поле в канале. *Канал с резистивным электродом* привлекает простотой изготовления и управления, однако затрачиваемое на дрейф время ограничивает число элементов в таких регистрах. Создан матричный ФПЗС *резикон* с числом элементов 200×300 , однако дальнейшего развития это направление не получило.

Для обеспечения направленного переноса в сдвиговом ПЗС-регистре необходимы *стоп-канальные области* (см. § 1). Эти области препятствуют растеканию зарядов в стороны, т. е. в направлении, перпендикулярном направлению переноса. На рис. 1.19,а показан вид сверху и сечение (по электроду) простейшего сдвигового регистра с поверхностным каналом. С обеих сторон канала переноса образованы стоп-канальные области легированием подложки при-

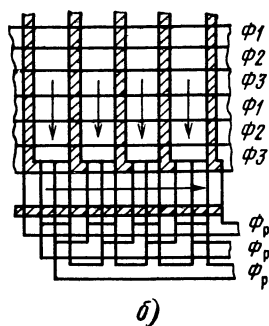
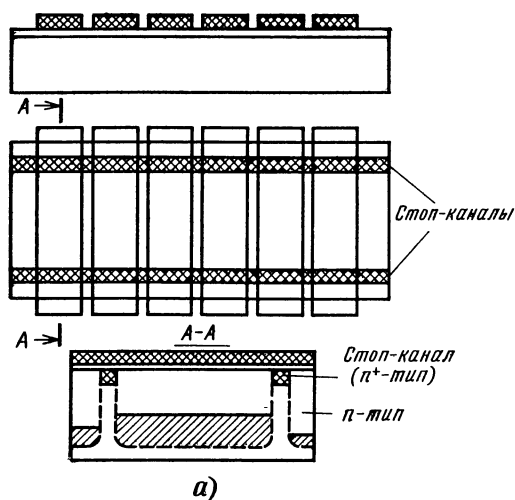


Рис. 1.19. Стоп-канальные области в ПЗС:

а — простой сдвиговой регистр;
б — объединение вертикальных регистров с горизонтальным выходным регистром в трех-фазной матрице

месью того же типа проводимости, но с гораздо большей концентрацией. На рис. 1.19 видно, что электрод расположен поверх и канала переноса, и стоп-канальных областей, однако при приложении к электроду смещения потенциальная яма образуется только в канале переноса. Уровень легирования стоп-канальных областей подобран столь высоким, что состояние обеднения в них не достигается при максимальном смещении. По сути дела, стоп-канальные области образуют такие же потенциальные барьеры, что и барьерные области, необходимые для обеспечения асимметрии в канале переноса. Различие в том, что высоту потенциального барьера на границе канала переноса и стоп-канальной области не подбирают, а делают максимальной, чтобы обеднение не наступало во всем диапазоне рабочих напряжений.

Для формирования стоп-канальных областей используют те же методы, что и для создания потенциальных барьеров в канале переноса: к специальному электроду прикладывают смещение, вызывающее под ним состояние аккумуляции (индуцированные стоп-канальные области), либо легируют примесями и изменяют толщину оксида (встроенные стоп-канальные области). Часто применяют сочетание нескольких методов с целью повысить надежность ограничения канала переноса. Используют легирование примесью того же типа проводимости, что и примесь в подложке, но вводят ее с высокой концентрацией в ПЗС с поверхностным и объемным каналами переноса. Последнее кажется парадоксальным, так как в объемном канале потенциальный барьер возникает при снижении концентрации примеси. Однако высота потенциального барьера, образуемого таким способом, не всегда достаточна для боковой изоляции зарядов, поэтому предпочитают применять более надежный способ подавления обеднения.

С помощью стоп-канальных областей можно соединять и разделять каналы переноса. На рис. 1.19,б показано, как несколько

сдвиговых регистров, отделенных стоп-канальными областями друг от друга, соединяются затем в общий регистр (узел, всегда встречающийся в двумерных ПЗС в месте стыковки матрицы с выходным регистром). Разветвление канала переноса с помощью клиновидной стоп-канальной области используют для разделения зарядового пакета в нужном соотношении частей.

Направленное введение носителей заряда в ПЗС обычно осуществляют электрическим или оптическим путем (возможны и другие способы). Для электрического ввода используют *p-n*-переход, смещенный в прямом направлении (относительно поверхностного потенциала под ближайшим к переходу электродом). Эмиттируемые *p-n*-переходом носители заряда собираются в потенциальной яме этого электрода, причем накапливаемый зарядовый пакет пропорционален смещению (току) *p-n*-перехода и времени инжекции, т. е. несет информацию. Таким способом, например, вводят электрические символы «0» и «1» в запоминающих устройствах на ПЗС, *фоновый заряд* в фоточувствительных ПЗС и т. д.

На рис. 1.20, *а*, где ЭС — электрод сравнения, $\Phi 2$, $\Phi 3$ — фазовые электроды, показана простейшая конструкция входного устройства, представляющая собою МОП-транзистор, у которого истоком является входной диод *VD*, затвором — входной затвор *З1*, на который подают сигнал, а стоком — потенциальная яма под первым электродом ПЗС-регистра (в данном случае под электродом

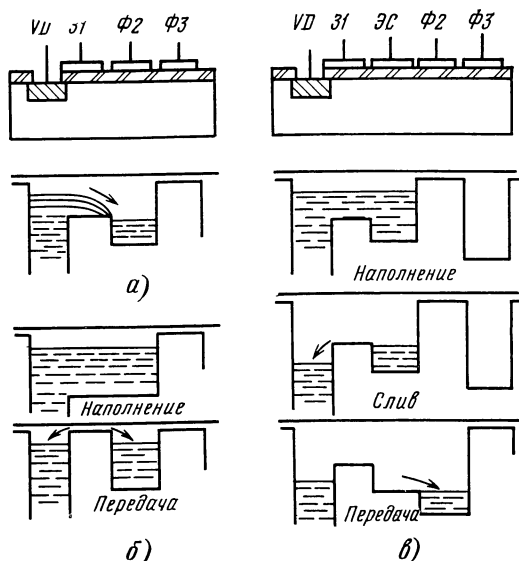


Рис. 1.20. Входные устройства и методы электрического ввода зарядов:

а — динамическая инжекция, *б* — отсечка диода, *в* — уравнивание потенциалов

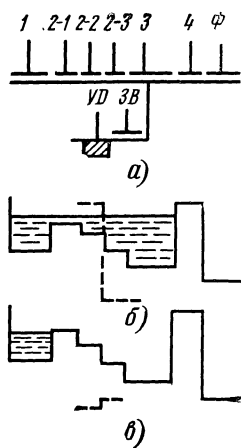


Рис. 1.21. Входное устройство 128-элементного мультиплексора:

а — структурная схема устройства; *б* — потенциальная диаграмма при инжекции; *в* — потенциальная яма при экстракции

дом фазы Φ_2). Заряд, накопленный за время t в потенциальной яме при смещенном в прямом направлении истоке, будет равен $Q_{\text{вх}} = \mu W C_d (U_{\text{вд}} - U_{\text{з1}} - U_{\text{пор}}) / 2L$, где μ — поверхностная подвижность носителей; W , L — ширина канала переноса и длина входного затвора; $U_{\text{вд}}$, $U_{\text{з1}}$ и $U_{\text{пор}}$ — напряжения истока, входного затвора и пороговое.

Подобный метод ввода, называемый *методом динамической инжекции*, прост в исполнении, но вносит большие шумы. Дисперсия введенного заряда определяется флуктуациями тока истока и разностью напряжений между истоком и входным затвором. Флуктуации времени ввода также вносят дополнительный шум. Кроме того, метод принципиально не обеспечивает линейный ввод сигнала, так как емкость обедненного слоя потенциальной ямы изменяется при заполнении ямы зарядом.

Лучшие результаты дает *метод отсечки диода* (рис. 1.20,б), когда напряжение сигнала подают на исток; входной затвор при этом открыт, и яма под первым электродом ПЗС заполняется. Затем входной затвор закрывают, изолируя тем самым зарядовый пакет от истока. При изоляции введенного заряда шумы снижаются, но нелинейность остается.

Низкошумящий линейный ввод можно осуществить, добавив еще один электрод сравнения (на рис. 1.20,в ЭС). Между входным затвором и электродом сравнения устанавливают регулируемую разность потенциалов. Входной сигнал будет пропорционален этой разности. Подчеркнем, что под входным затвором потенциальная яма должна быть глубже, чем под электродом сравнения. Сначала на исток подают смещение, при котором носители заполняют обе потенциальные ямы. Затем переключают смещение истока так, чтобы носители могли перетекать обратно в исток. В результате в более глубокой яме останется часть заряда, соответствующая поданной разности потенциалов. Такой метод ввода называется *методом уравнивания потенциалов* или *инжекцией-экстракцией*, и заряд зависит не от значения порогового напряжения, а только от разности пороговых напряжений двух соседних электродов. На оба управляющих электрода подают постоянные смещения, что значительно снижает уровень шумов.

Часто в ФПЗС встречается *задача множественного параллельного ввода* электрических сигналов. Примерами тому служат вводы фонового заряда в вертикальные столбцы матриц и сигнала в ячейки считывающего ПЗС-регистра с фотодиодов строчно-кадрового перекося (СКП) матрицы или со столбцовых шин ХУ-матриц. Для параллельного ввода применяются более сложные входные устройства, в которых различие в пороговых напряжениях не влияет на величину вводимого заряда. В [7] описано подобное входное устройство; в нем процессом инжекции-экстракции носителей из истока и обратно в сток, а затем ввода сформированного зарядового пакета в ПЗС-регистр управляет один и тот же затвор, на который подаются попеременно опорное напряжение и сигнал.

Особенно ответственна роль входного устройства при параллельном вводе малых сигналов с фотодиодов в гибридных ФПЗС инфракрасного (ИК) диапазона. Уровень сигналов, передаваемых с фотодиодов в мультиплексор (т. е. ПЗС-регистр со входом в каждом элементе), в этом случае составляет доли милливольт. На рис. 1.21 (штриховыми линиями обозначены потенциалы на диоде и входном затворе) показано входное устройство 128-элементного мультиплексора [8], работающего по *методу выдавливания заряда*, близкого к методу уравнивания потенциалов. Входной диод VD и входной затвор $ЗВ$ расположены сбоку регистра; сигнал подают на затвор 1 (исток), отделенный от затвора 3 (сток) тремя затворами $2-1$, $2-2$ и $2-3$. Вначале с помощью входных диода и затвора заполняют (*инжекция*) потенциальные ямы под затворами 1 , 2 и 3 (рис. 1.21,б), затем сливают (*экстракция*) в диод избыточный заряд так, чтобы под затвором 1 остался зарядовый пакет, величина которого определится поверхностным потенциалом затвора (рис. 1.21,в). При приходе сигнала уменьшение смещения на затворе 1 вызовет подъем дна потенциальной ямы истока и перетекание (*выдавливание*) пропорционального изменению смещения количества носителей заряда в сток. Открывая затвор 4 , передают сигнальный заряд дальше в регистре под фазу Φ . При данном методе так же, как и при уравнивании потенциалов, используется инжекция-экстракция, однако появление сигнала приводит к уменьшению глубины потенциальной ямы истока и выдавливанию заряда. Разброс глубины потенциальных ям в истоках параллельных входов не играет роли, так как он компенсируется при начальном наполнении носителями заряда. Геометрический шум описанного мультиплексора был на порядок меньше шума, свойственного обычному *методу уравнивания потенциалов*. Примерами решения проблемы высокоэффективного параллельного ввода сигналов в элементы ПЗС-регистра служат ХУ-матрицы с инвертирующими усилителями и «подкачкой» заряда (см. гл. 2).

Выходные устройства в ФПЗС преобразуют зарядовые пакеты в изменения тока или напряжения, усиливают эти изменения, согласуют выход ФПЗС с внешней нагрузкой, осуществляют подавление тактовых помех, а в ряде случаев и геометрического шума. Можно выделить два типа выходных устройств: с токовой выходной цепью под постоянным потенциалом и использованием *эффекта изменения плавающего потенциала* на выходной емкости. Токковая цепь образована смещенным в запорном направлении выходным диодом, соединенным с входом операционного усилителя [7]. Обратная связь по току стабилизирует смещение на диоде, обеспечивает хорошую линейность и низкий импеданс выхода ФПЗС, а отсутствие стробирования резко снижает тактовые помехи (от последнего фазового электрода выходной диод отделен выходным затвором, находящимся под постоянным смещением). Недостатком этого варианта, примененного в первых разработках ПЗС, являлась большая паразитная емкость на выходе, поскольку операционный усилитель выполнялся вне кристалла ФПЗС.

Способ детектирования зарядового пакета по изменению плавающего потенциала проще, позволяет размещать выходное устройство целиком на кристалле и используется практически во всех ФПЗС. Плавающий потенциал устанавливается либо на МОП-емкости — *плавающий затвор* (ПЗ), либо на емкости *p-n-перехода* — *плавающая диффузионная область* (ПДО). На рис. 1.22 показано, как работает простейшее выходное устройство с плавающим *p-n-переходом*. С помощью диффузии или ионного легирования создают область противоположного подложке типа проводимости, расположенную рядом с последним электродом сдвигового регистра, но отделенную от него затвором $3B$. Зарядку диффузионной области до плавающего потенциала производят, соединяя ее электрически с другой диффузионной областью, на которую постоянно подано обратное смещение (положительное для нашего примера). Соединение осуществляется путем создания на короткое время проводящего канала между двумя областями; по сути дела, эти области являются стоком и истоком МДП-транзистора, называемого *транзистором сброса* или *транзистором — восстановителем потенциала* VT . Когда на затвор транзистора сброса подано импульсное обедняющее смещение, плавающая диффузионная область зарядится от источника E (рис. 1.22,а). Затем транзистор сброса запирается, и область остается заряженной и изолированной, готовой к приему зарядового пакета (рис. 1.22,б). Приход зарядового пакета в плавающую диффузионную область вызовет изменение ее потенциала, равное величине заряда, деленной на емкость узла считывания, т. е. емкости плавающей диффузионной области и присоединенного к ней затвора выходного тран-

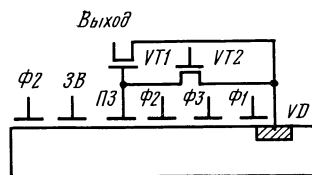
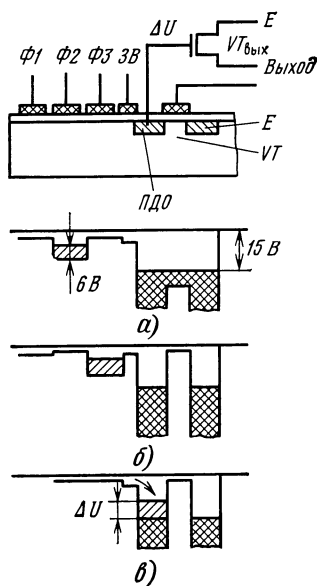


Рис. 1.23. Выходное устройство с плавающим затвором

←
Рис. 1.22. Принцип работы выходного устройства с плавающей диффузионной областью:

а — зарядка ПДО до плавающего потенциала; б — отключение ПДО; в — зарядовый пакет переходит в ПДО

зистора $VT_{\text{вых}}$. Изменение потенциала, поступающего на затвор выхода $VT_{\text{вых}}$, изменяет ток, протекающий через него (рис. 1.22, в).

После того как зарядовый пакет попал в плавающую диффузионную область и вызванное этим изменение потенциала затвора $VT_{\text{вых}}$ привело к появлению импульса на выходе, необходимо очистить плавающую диффузионную область от «отработанного» заряда и восстановить ее потенциал. Это достигается при следующем такте открывания VT . На затвор VT поступает положительный импульс, транзистор открывается, и зарядовый пакет перетекает из плавающей диффузионной области в диффузионную область, соединенную с источниками питания. Плавающая область освобождается от заряда, заряжается вновь до потенциала источника питания и становится готовой к приему очередного зарядового пакета (см. рис. 1.22, а).

Один из серьезных недостатков устройств с ПДО заключается в необходимости каждый раз после детектирования восстанавливать плавающий потенциал до опорного уровня. При этом транзистор сброса может работать в пологой или крутой области характеристик. Если смещение стока транзистора сброса больше, чем поверхностный потенциал под его затвором, рабочая точка находится в пологой области характеристик, и переходной процесс аналогичен самоиндуцированному дрейфу заряда. Если, наоборот, смещение стока меньше поверхностного потенциала под затвором, транзистор работает в крутой области, в режиме ключа, и переходной процесс аналогичен заряду емкости выходного узла через резистор. Оценки показывают, что быстрдействие типового по размерам транзистора сброса гораздо выше (в 40 раз) при работе в ключевом режиме, нежели в области пологих характеристик. Однако при работе в режиме ключа появляется неопределенность в направлении остатков зарядового пакета, из-за малого смещения на стоке часть носителей может направиться не в область стока и затем во внешнюю цепь, а вернуться в ПДО, чтобы добавиться к следующему зарядовому пакету. Возникает *шум разбрызгивания* [9], величина которого зависит от длины канала транзистора сброса. В отличие от ПДО плавающий затвор не нуждается в постоянном восстановлении потенциала, поскольку работает «на проход», в режиме неразрушающего считывания. Как показано на рис. 1.23, ПЗ так же соединен со стоком транзистора $VT2$ сброса и затвором активного транзистора $VT1$, как и в случае ПДО. Однако выходное устройство с ПДО заканчивается транзистором сброса (его стоком), а в выходном устройстве с ПЗ «отработанный» зарядовый пакет попадает не в транзистор сброса, а под примыкающий к ПЗ тактируемый электрод и затем, либо следует далее по регистру, либо переходит в постоянно смещенный сток. После вывода зарядового пакета из-под ПЗ плавающий потенциал восстанавливается практически полностью. Для полного восстановления уровня плавающего потенциала ПЗ подсоединяют к стоку транзистора сброса один раз за время строки (при обратном ходе строчной развертки). Сравнение выходных устройств

с ПДО и ПЗ говорит, казалось бы, в пользу последнего, так как устраняется основной источник детерминированных помех — наводка от импульсов управления затвором транзистора сброса, отсутствуют связанные с работой транзистора сброса в ключевом режиме шумы разбрызгивания и легче осуществляется неразрушающее считывание. С ПДО такое считывание возможно, но с меньшим быстродействием. Тем не менее в большинстве современных ФПЗС используют ПДО, позволяющую эффективнее преобразовывать заряд в изменение потенциала.

Усилия разработчиков выходных устройств направлены на подавление наводок, снижение шумов и повышение быстродействия. Для подавления наводок иногда вводят дополнительный экранирующий затвор, применяют МОП-тетрод сброса. Эта мера эффективна, но из-за увеличения длины канала в тетроде падает быстродействие, кроме того, часть зарядового пакета остается под экранирующим затвором и теряется для детектирования. Хорошо зарекомендовал себя двухкаскадный истоковый повторитель с ПДО. Поскольку первый каскад работает не на внешнюю нагрузку, то его активный транзистор может быть выполнен минимальным по размерам, что позволяет снижать емкость узла считывания и улучшать быстродействие. Между каскадами можно встроить МОП-транзистор, позволяющий осуществлять операцию выборки. На затвор транзистора выборки подают открывающий импульс, длительность которого меньше длительности импульса, подаваемого на затвор транзистора сброса. Благодаря этому помехи от включения — выключения транзистора сброса в значительной мере экранируются. Напомним, что помехи от фазовых импульсов менее существенны, ибо фазовые электроды отделены от выходного устройства находящимся под постоянным потенциалом выходным затвором.

Транзистор сброса должен обеспечить полное удаление отработанного зарядового пакета из ПДО. Это означает, что на сток транзистора сброса приходится подавать большое смещение: в ПЗС-регистрах с поверхностным каналом — больше суммы смещения на фазовом электроде и потенциала плоских зон; регистрах с объемным каналом — больше суммы потенциального минимума в канале и потенциала плоских зон. Для снижения подаваемого на сток транзистора сброса смещения можно поместить между стоком и затвором транзистора два фазовых электрода [10]. В этом случае под одним из фазовых электродов образуется *виртуальный сток*, потенциал которого выше потенциала реального диффузионного стока. Виртуальный сток отделен от диффузионного стока дополнительным стоковым затвором, который тактируется синфазно с выходным затвором. Подобная конструкция подавляет помехи от транзистора сброса, позволяет снижать смещение на стоке транзистора сброса и, по сути дела, обеспечить неразрушающее считывание; недостатком является повышенная емкость узла считывания. Избавиться от детерминированных помех можно с помощью схемы двойной коррелированной выборки, принцип рабо-

ты которой заключается в запоминании на емкости выходного сигнала в два момента времени: без зарядового пакета и после прихода зарядового пакета. Если интервал времени между выборками мал (меньше постоянной времени переключения транзистора сброса, что выполнить нетрудно), детерминированные шумы в моменты выборок коррелированы и после вычитания остается сигнал, качество которого определяется только тщательностью выполнения схемы двойной коррелированной выборки.

Физические ограничения процессов, происходящих в ПЗС-регистре. Предельная величина заряда, размещаемого в потенциальной яме, ограничена максимальной зарядовой емкостью ямы. В иностранной литературе используется термин «управляющая способность», т. е. максимальный заряд, которым можно управлять в ПЗС данной конструкции при заданных смещениях. Обычно говорят просто о зарядовой емкости, имея в виду максимальную. Абсолютные значения зарядовой емкости определяются лавинным пробоем: в случае поверхностного канала — диэлектрика; объемного канала — приповерхностного обедненного слоя полупроводника. Для поверхностного канала максимальная удельная плотность заряда равна $Q_{\max} = \epsilon_0 \epsilon_d E_{\max} \approx 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2} = 10^{13} \text{ электронов} \cdot \text{см}^{-2}$, где E_{\max} — напряженность поля, при которой наступает пробой диэлектрика (для диоксида кремния $(1 \dots 5) \cdot 10^6 \text{ В} \cdot \text{см}$).

Для объемного канала максимальный заряд определяется выражением (1.12), в которое надо подставить максимальную допустимую концентрацию $N_{d \max}$. Значение $N_{d \max}$ находится из условия развития лавинного пробоя в обедненном приповерхностном слое n -типа при некоторой максимальной напряженности поля. Для p - n -переходов с резким распределением примеси $E_{\max} = (5 \dots 8) \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-2}$, следовательно, $Q_{\max \text{ об}} = q N_{d \max} x_{pn} = E_{\max} \epsilon_0 \epsilon_n \approx 3,13 \cdot 10^{12} \text{ электрон} \cdot \text{см}^{-2}$.

Абсолютный максимум зарядовой емкости ПЗС с объемным каналом примерно в 3 раза меньше, чем у зарядовой емкости ПЗС с поверхностным каналом. В [7, с 81] дано соотношение зарядовых емкостей ПЗС с поверхностным и объемным каналом (геометрия электродов одинакова) при условии, что заряд в объемной потенциальной яме не доходит до поверхности, и примесь в канале распределена равномерно, т. е.

$$Q_{\max \text{ об}} = Q_{\max \text{ пов}} / (1 + \epsilon_d x_{pn} / 2 \epsilon_n x_d). \quad (1.14)$$

Из (1.14) следует, что с увеличением глубины объемного канала зарядовая емкость уменьшается. Стремление сделать канал мелким для увеличения зарядовой емкости вступает в противоречие с необходимостью сохранить быстроедействие. В глубоком объемном канале выше напряженность краевого поля и перенос протекает быстрее. Компромиссное решение выразилось в разработке ПЗС с *перистальтическим объемным каналом*. В таких ПЗС удачно сочетаются высокие рабочая частота и зарядовая емкость, в сравнении с обычным объемным каналом частота возрастает с $10 \dots 20 \text{ МГц}$ до 100 МГц и выше, зарядовая емкость увеличивается в 3,5 раза.

Реально в ПЗС зарядовая емкость определяется не только и не столько физическими ограничениями, сколько конструкцией и режимами работы. Так, если сравнить ПЗС с двух-, трех- и четырехфазными структурами и одинаковой площадью элемента, нетрудно представить, что в трехфазном ПЗС зарядовая емкость равна 1/3 общей емкости элемента, а в четырехфазном мо-

жет составлять и $1/4$, и $1/2$ емкости элемента в зависимости от способа тактирования. Максимальная зарядовая емкость, равная половине емкости элемента, достигается при разливании заряда по двум соседним потенциальным ямам одинаковой глубины. Зарядовая емкость зависит также от формы и перекрытия тактовых импульсов. Трехфазный ПЗС-регистр может, например, работать на импульсах не прямоугольной, а синусоидальной формы, что позволяет упростить управление, но приводит к заметному снижению зарядовой емкости [7, с. 79].

Говоря о зарядовой емкости, следует помнить, что в потенциальной яме всегда присутствует, помимо информационного заряда, заряд термогенерированных носителей, и под него тоже приходится отводить часть ямы. Кроме того, в ПЗС с поверхностным каналом всегда и в ПЗС с объемным каналом при работе на малых уровнях сигнала к информационному заряду намеренно добавляют небольшой заряд, называемый *фоновым зарядом* (также *жирный ноль*, *непустой ноль*). Фоновый заряд снижает неэффективность переноса, заполняя ловушки и мешая им захватить информационные носители заряда.

Неэффективность переноса ϵ ограничивает число элементов в сдвиговом регистре. Механизм неэффективности рассмотрен в § 12, поэтому остановимся только на том, как отражается неэффективность переноса на работе ПЗС-регистра. Если на вход ПЗС-регистра, состоящего из n элементов, подать одиночный импульс, то на выходе такой же одиночный импульс появится только при полном отсутствии потерь переноса, т. е. при $n\epsilon=0$, где $n\epsilon$ — общая неэффективность переноса. Реально $n\epsilon$ отличается от нуля и чем больше, тем сильнее изменяется картина на выходе ПЗС.

Выходной импульс от одиночного зарядового пакета с ростом общей неэффективности переноса не только уменьшается по амплитуде, но и расплывается в ряд импульсов убывающей амплитуды. Если в ПЗС вводится серия импульсов (пачка), на выходе наблюдается уменьшение амплитуды первого и следующих за ним импульсов, а за последним импульсом серии появляется хвост из дополнительных импульсов. При большой общей неэффективности серия импульсов расплывается настолько, что огибающая принимает вид гауссовского распределения.

Темновой ток ограничивает время накопления и хранения информационного заряда, т. е. определяет нижний предел рабочих частот. Темновой ток имеет генерационную природу (см. § 11) и определяется температурой полупроводника, а также степенью совершенства границы раздела диэлектрик — полупроводник и кристаллической решетки полупроводника. С ростом температуры темновой ток возрастает примерно вдвое на каждые 8° . Поскольку в ПЗС манипулируют с весьма малыми количествами зарядов, темновой ток стремятся максимально понизить, совершенствуя технологию и охлаждая приборы с помощью микрохолодильников. Следует упомянуть о возможности появления большого темнового тока в результате паразитной инжекции. В ПЗС всегда есть отдельные *p-n*-переходы — входные диоды, опорные диоды для защиты электродов от перенапряжений и др. Если по каким-либо причинам *p-n*-переход сместится относительно подложки в прямом направлении, большое количество носителей будет инжектировано в подложку. Диффундируя в подложке, носители могут добраться до электродов регистра и заполнить часть потенциальных ям. На выходе это проявится в виде аномально большого всплеска темнового тока.

Шумы ограничивают точность передачи информации, в особенности при минимальных зарядовых пакетах. Шумы представляют флуктуации выходного сигнала во времени и возникают по двум причинам: во-первых, из-за флуктуаций зарядового пакета при накоплении и переносе, во-вторых, из-за шума входного и выходного устройств. Соответственно различают шум генерационный, захвата и «*kTC*-шум», т. е. шум емкости входного или выходного узла.

Генерационный шум возникает в процессе накопления и хранения зарядового пакета. Процесс носит случайный характер, количество носителей заряда в пакете во времени изменяется, флуктуирует и описывается распределением Пуассона, для которого дисперсия равна среднему значению: $\overline{\Delta n^2_{\text{ген}}} = n_{\text{ген}}$, где $\Delta n_{\text{ген}}$ — число шумовых электронов, связанных с генерацией; $n_{\text{ген}}$ — среднее число генерированных носителей. Если генерация носителей вызвана светом, то шум называют *фотонным*. Термическая генерация мало отличается от оптической и описывается тем же выражением. Генерационный шум имеет равномерное частотное распределение, т. е. является *белым шумом*.

Шум захвата проявляется из-за того, что процессы захвата и эмиссии носителей заряда поверхностными и объемными состояниями случайны. В отличие от генерационного шума захвата является *дробовым* и имеет частотное распределение, различное для поверхностного и объемного каналов. Можно предположить, что основной вклад в шум захвата внесут состояния, имеющие постоянную времени генерации, равную по порядку времени переноса. Наиболее быстрые состояния полностью опустошатся за время переноса, а самые медленные будут на это время заполнены. Следовательно, и те, и другие в шуме не участвуют. Шум захвата поверхностными состояниями с плотностью $N_{\text{п.с}}$ описывается выражением

$$\overline{\Delta n^2_{\text{захв}}} = q^2 k T A_{\text{э}} N_{\text{п.с}} \ln 2 \quad (1.15)$$

и приближенно равен дробовому шуму носителей, генерируемых поверхностными состояниями из энергетической полосы шириною kT [7, с. 135]. Шум не зависит от времени и пропорционален плотности поверхностных состояний. *Шум объемных состояний* подсчитать сложнее, так как объемным состояниям присущи дискретные энергетические уровни. В отличие от случая непрерывного энергетического спектра поверхностных состояний шум объемных состояний зависит от времени t возможной генерации. Для моноэнергетических объемных состояний с плотностью $N_{\text{о.с}}$, постоянной времени генерации $\tau_{\text{о.с}}$ можно найти, что шум достигает максимума при $t = \tau_{\text{о.с}} \ln 2$ и равен $\overline{\Delta n^2_{\text{захв}}} \approx 0,25 U_{\text{зар}} N_{\text{о.с}}$, где $U_{\text{зар}}$ — объем зарядового пакета. Если в полупроводнике есть несколько видов объемных состояний с разными энергетическими уровнями, то шум захвата будет суммой $\overline{\Delta n^2_{\text{захв}}}$ для каждого уровня. Поскольку шум захвата объемными состояниями зависит от времени, то уровень шума в ПЗС с объемным каналом зависит от рабочей частоты (в отличие от ПЗС с поверхностным).

Значение «*kTC*-шума» определяется температурой ПЗС и эффективными емкостями входного или выходного устройств.

В выходном устройстве основную роль играет емкость узла считывания $C_{\text{у.с}}$. Шум определяется выражением $\overline{\Delta n^2_{\text{вых}}} = 2kTC_{\text{у.с}}/3q^2$.

Помимо перечисленных флуктуационных шумов, имеющих случайную природу, при работе с ПЗС приходится иметь дело с *детерминированными шумами*.

ми, к которым относятся помехи от тактового питания и *геометрические шумы*. Геометрические шумы представляют собою неоднородность распределения темнового тока или информационного заряда, введенного оптическим путем (из-за неоднородной фоточувствительности элементов). Детерминированные шумы по величине намного превышают флуктуационные, но от них легче избавиться схемотехническими и технологическими приемами, так как они определены во времени (помехи) и пространстве (геометрические шумы).

Проведем сравнение поверхностного и объемного каналов:

1. Эффективность переноса в объемном канале выше, так как плотность объемных ловушек меньше, чем поверхностных. Введение фонового заряда, насыщающего поверхностные ловушки, улучшает эффективность переноса, однако до настоящего времени рекорд остается за объемным каналом — эффективность 0,9999868 на один перенос.

2. Удельная зарядовая емкость выше у поверхностного канала, хотя, подбирая профиль распределения примеси и глубину объемного канала, можно добиться повышения его удельной емкости до 60 ... 70 % от значения этого параметра у поверхностного канала.

3. Быстродействие объемного канала гораздо выше. Объясняется это краевыми тянущими полями. Напряженность таких полей возрастает по мере перемещения канала от поверхности вглубь, но одновременно при этом снижается удельная зарядовая емкость. Поэтому наилучшие результаты достигаются в перистальтическом канале (рабочая частота превышает 100 МГц, а зарядовая емкость достигает 50 % от емкости поверхностного канала)

4. Плотности темнового тока объемного и поверхностного каналов принципиально мало различаются и в основном определяются уровнем технологии.

5. Шумы объемного канала ниже — это следствие меньшей удельной зарядовой емкости и меньшей плотности ловушек.

Глава 2

ТИПЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

2.1. Оптический ввод информации

Схема, приведенная на рис. 2.1, иллюстрирует основные процессы, протекающие в ФПЗС. Выделены четыре способа ввода оптической информации: непосредственный оптический ввод со стороны электродов и с обратной стороны подложки; с использованием фоточувствительного слоя; фотоэлектронным преобразованием. Для оптического ввода могут быть использованы *внутренний и внешний фотоэффекты*. Внутренний фотоэффект возникает при поглощении фотонов в полупроводнике и генерации в результате этого носителей заряда. Возможны два основных механизма преобразования:

собственный фотоэффект, заключающийся в образовании поглощенным фотоном пары электрон (в зоне проводимости) и

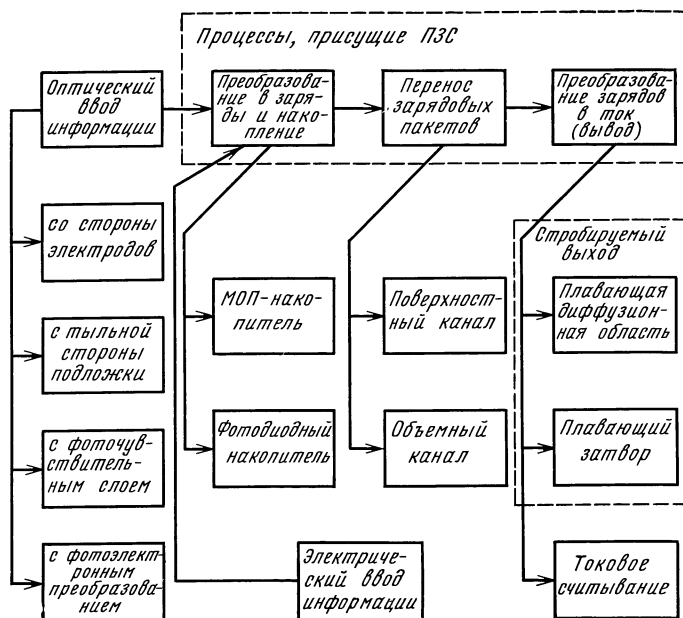


Рис. 2.1. Процессы, протекающие в ФПЗС, и способы их реализации

дырка (в валентной зоне). Такой механизм имеет место в том случае, если энергия фотона больше ширины запрещенной зоны;

примесный фотоэффект, возникающий в результате возбуждения донора или акцептора поглощенным фотоном и образования одного носителя — электрона в зоне проводимости или дырки в валентной зоне. Для появления примесного фотоэффекта достаточно, чтобы энергия фотона была больше энергии возбуждения примеси (но меньше ширины запрещенной зоны).

Кремниевые ФПЗС, работающие в видимой области, используют исключительно собственный фотоэффект, обеспечивающий высокую эффективность преобразования оптической формы изображения в зарядовую. Ценою снижения эффективности можно подвинуться в прилегающие к видимому диапазону области ближнего ультрафиолетового (УФ) излучения (до 250 нм) и ближнего ИК-излучения (до 1100 нм). В ФПЗС ИК-диапазона используют как собственный, так и примесный фотоэффекты. Представляющие интерес области ИК-диапазона обычно связаны с границами «окон» пропускания ИК-излучения атмосферой: 3... 5 и 8... 14 мкм. Энергия таких ИК-фотонов недостаточна для перехода носителя через запрещенную зону кремния, так что приходится применять в качестве материала подложки *узкозонные полупроводники* — антимонид индия, тройные соединения кадмий — ртуть — теллур (КРТ), индий — галлий — сурьма. Технология ФПЗС на узкозонных полупроводниках намного сложнее технологии крем-

ниевых ФПЗС. Сами полупроводники не столь хорошо изучены, свойства их мало воспроизводимы и нестабильны. По этой причине достаточно широко для создания ИК-ФПЗС используется все-таки кремний, легированный цинком, серой, таллием и другими примесями, обеспечивающими чувствительность в требуемом участке ИК-диапазона. Примесный механизм менее эффективен чем собственный, и ФПЗС на примесном кремнии требуют более глубокого охлаждения чем ФПЗС на узкозонных полупроводниках, однако высокая технологичность кремния компенсирует эти недостатки.

В ФПЗС ИК-диапазона с диодами Шотки успешно используется внешний фотоэффект, в основе которого лежит поглощение фотонов не в полупроводнике, а в слое металла или силицида металла с последующей эмиссией носителей в полупроводник. На кремниевой подложке создают диоды Шотки, которые служат чувствительными фотоэмиссионными элементами. Диод Шотки смещают в запертом направлении и оставляют под плавающим потенциалом. Подложка под ним находится при этом в состоянии обеднения. Информационное излучение, поглощаясь металлом и (или) силицидом металла, возбуждает носители и сообщает им импульс, достаточный, чтобы преодолеть энергетический барьер и попасть в полупроводник. Ширина обедненной области изменяется, соответственно меняется и плавающий потенциал электрода диода Шотки. Изменение плавающего потенциала, поданное на разрешающий затвор, управляет перетеканием зарядов в элемент считающего ПЗС-регистра.

Процесс поглощения фотонов в полупроводнике рассмотрим на примере кремниевого ФПЗС для видимого участка спектра. Излучение, прежде чем поглотиться в полупроводнике, проходит довольно сложную систему отражающих и поглощающих слоев. В простейшем варианте на поверхности кремния лежит тонкий слой (около 50 нм) естественного оксида, отражающий около 70% излучения видимого диапазона [11]. Реально же приходится иметь дело с пассивирующими пленками оксида и фосфоросиликатного стекла, поликремневыми электродами, диэлектрической системой оксид — нитрид кремния, отделяющей электроды от подложки. В такой многослойной системе каждый слой характеризуется толщиной и комплексным показателем преломления, в котором действительная часть — обычный показатель преломления n , а модуль мнимой части — коэффициент экстинкции k , определяющий поглощение излучения и связанный с коэффициентом поглощения α соотношением $\alpha = 4\pi k/\lambda$. Зная параметры слоев, можно рассчитывать коэффициент пропускания системы T , равный отношению мощности излучения, прошедшего в подложку, к мощности излучения, падающего на первую поверхность раздела. Не приводя полностью расчетов для конкретных систем воздух — оксид — кремний и воздух — оксид — поликремний — оксид — кремний [11], отметим, что зависимость коэффициента пропускания от длины волны при фиксированной толщине

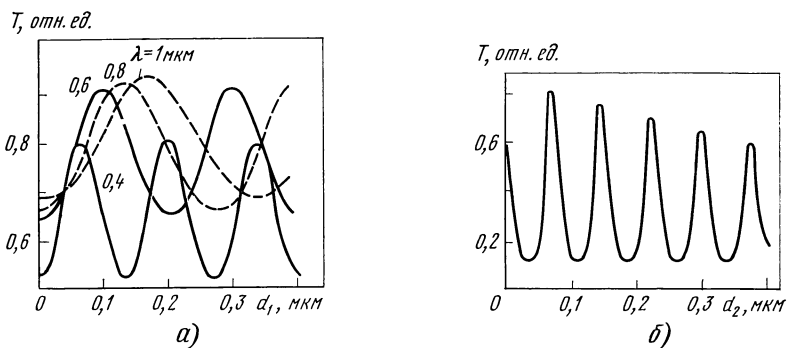


Рис. 2.2. Зависимости коэффициента пропускания от толщины: d_1 слоя оксида в системе воздух — оксид — кремний для различных длин волн (а) и от толщины d_2 слоя поликремния в системе воздух — оксид (а) — поликремний — оксид (d_3) — кремний для длины волны 0,6 мкм и $d_1=206$ нм, $d_3=125$ нм (б)

не слоя носит периодический характер. Точно также периодически изменяется коэффициент пропускания при изменении толщины слоя и фиксированной длине волны излучения. На рис. 2.2,а приведены расчетные зависимости пропускания системы воздух — оксид — кремний как функции толщины оксида d_1 для длин волн 0,4 ... 1 мкм. Видно, что при некоторых значениях толщины оксида, например при толщине около 0,1 мкм, удается добиться высокого пропускания практически во всем диапазоне длин волн, т. е. осуществить *просветление* многослойной системы. Просветление в широком спектральном диапазоне особенно важно в ФПЗС, предназначенных для работы в аппаратуре цветного телевидения. При формировании черно-белого изображения или работе в узком спектральном интервале задача просветления облегчается.

Период изменения функции пропускания от толщины слоя при постоянной длине волны пропорционален $\lambda/2n$, т. е. для слоев с большим коэффициентом преломления период уменьшится. Зависимость на рис. 2.2,б коэффициента пропускания от толщины слоя поликремния d_2 для системы воздух — оксид — поликремний — оксид наглядно показывает, что функция пропускания колеблется чаще, чем для системы оксид — кремний. Незначительные отклонения толщины слоя поликремния d_2 вызывают резкое изменение коэффициента пропускания (коэффициенты преломления — оксида $n \approx 1,45$; поликремния $n \approx 4$). Подбирая толщины слоев оксида и поликремния, можно оптимизировать пропускание в видимом диапазоне излучения, но в любом случае толщину поликремниевых электродов стремятся сделать как можно меньшей, чтобы снизить поглощение. Уменьшение толщины приводит к росту сопротивления фазовых электродов, что отрицательно влияет на быстродействие ФПЗС. Обычно толщина поликремниевых слоев составляет 0,5 ... 0,6 мкм, и электроды та-

кой толщины поглощают значительную долю излучения, особенно в синей части видимого диапазона. Решением проблемы является: уменьшение толщины до $0,1 \dots 0,15$ мкм; использование электродов с окнами или расположенных так, чтобы часть фоточувствительной ячейки оставалась открытой; замена поликремния проводящими и прозрачными оксидами таких металлов, как олово, индий, сурьма. Последний прием весьма заманчив: оксиды металлов обладают достаточно малым сопротивлением (около 20 Ом для слоев $0,3 \dots 0,5$ мкм), поглощают в видимом диапазоне в $3 \dots 4$ раза меньше, чем поликремний, и имеют коэффициент преломления, близкий к 2 , т. е. лучше поликремния согласуются с воздухом и диоксидом кремния. Тем не менее широкого применения оксиды металлов не нашли (по крайней мере, до настоящего времени) из-за меньшей технологичности. В подавляющем большинстве современных ФПЗС используется поликремний, прекрасно вписывающийся в технологию МОП-БИС, на основе которой сформировалась ПЗС-технология. Низкая технологичность ограничивает и применение в ФПЗС видимого диапазона способа ввода оптической информации с обратной стороны подложки. Для того чтобы осуществить этот способ ввода, подложка должна быть весьма тонкой ($5 \dots 10$ мкм), в противном случае фотогенерированные на обратной стороне носители заряда не достигнут активной части прибора. Воспроизводимое травление подложки до столь малой толщины затруднительно, хотя используются селективные травители, действие которых приостанавливается на границе слоя p^+ -типа. Фоточувствительные ФПЗС с тонкой подложкой обладают высокой чувствительностью, и, в отличие от ФПЗС с поликремниевыми электродами, на спектральной кривой чувствительности отсутствуют характерные пики, вызванные повторными отражениями в многослойной электродной системе. Широкого распространения, однако, эти ФПЗС не находят и остаются уникальными изделиями для специальных применений (в основном в астрономической аппаратуре). Напротив, в кремниевых ФПЗС ИК-диапазона используется именно оптический ввод информации с обратной стороны подложки. В ИК ФПЗС с диодами Шотки кремниевая подложка практически не поглощает излучения. С обратной ее стороны наносят просветляющее покрытие, а над диодом Шотки предусматривают пленку металла — рефлектор, повышающий чувствительность ФПЗС. В ИК ФПЗС на примесном кремнии генерация и накопление носителей идут во всем объеме подложки, поэтому толщину подложки стараются увеличить.

Рассмотрим процесс поглощения в подложке фотонов, прошедших сквозь много- или однослойную поверхностную систему с коэффициентом пропускания T . Поглощение описывается выражением $\Phi(x) = \Phi_0 \operatorname{Texr}(-\alpha x)$, где $\Phi(x)$ — поток фотонов в плоскости (ось x направлена вглубь подложки перпендикулярно поверхности); Φ_0 — поток, падающий на ФПЗС; α — коэффициент поглощения материала подложки.

Если энергия фотонов много больше ширины запрещенной зоны, можно считать, что каждый фотон генерирует пару электрон—дырка, и скорость образования носителей под действием излучения (фотогенерация) равна $G_{\Phi}(x) = -\eta d\Phi/dx = \eta\Phi_0 T\alpha \times \times \exp(-\alpha x)$, η — *квантовый выход*, равен отношению числа фотогенерированных носителей заряда к числу поглощенных фотонов. Квантовый выход меньше единицы, так как, во-первых, не каждый фотон генерирует электронно-дырочную пару, во-вторых, не все фотоны поглощаются внутри подложки, имеющей конечную толщину, и, наконец, не все фотогенерированные носители образуют зарядовый пакет, поскольку обладают конечным временем жизни и могут рекомбинировать прежде, чем достигнут потенциальной ямы. Эффективность сбора фотогенерированных носителей связана с тем, какой используется в ФПЗС элемент накопления: МОП-накопитель или фотодиод (рис. 2.3). Несмотря на заметные практические различия в расчетах этих элементов, МОП-накопитель можно рассматривать, как фотодиод, у которого глубина p — n -перехода равна нулю и существуют только две области: обедненная (рис. 2.3,а) толщиной $d_{об}$ и квазинейтральная подложка n -типа толщиной X . В фотодиоде прибавляется приповерхностная квазинейтральная область; в нашем случае p -типа толщиной x_p (рис. 2.3,б). Носители, генерируемые в обедненной области, попадают все в потенциальную яму, так как рекомбинация здесь практически отсутствует. Носители, генерируемые в квазинейтральной области, диффундируют к границе обедненной области и, та часть, которая, не рекомбинируя, достигает ее под действием электрического поля, попадает также в потенциальную яму. Общий фототок I_{Φ} равен сумме тока в обедненной области $I_{об}$ и диффузионного тока $I_{диф}$:

$$\frac{dQ}{dt} = I_{\Phi} = I_{об} + I_{диф} = q \int_0^{d_{об}} G_{\Phi}(x) dx - I_{диф}(x_n, x_p), \quad (2.1)$$

где $I_{диф}(x_n, x_p)$ — плотность тока на границе обедненной области (в МОП-накопителе только x_n).

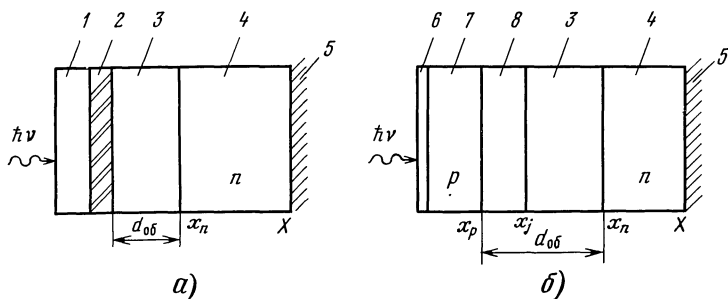


Рис. 2.3. Одномерная модель МОП-накопителя (а) и фотодиода (б):

1 — электрод; 2 — оксид; 3 — обедненная область подложки n -типа, 4 — квазинейтральная область подложки n -типа; 5 — контакт; 6 — инверсный слой, 7 — квазинейтральная p -область фотодиода; 8 — обедненная область p -слоя фотодиода

Опуская решение (2.1), которое можно найти в [11], приведем выражение для токов МОП-накопителя при условии, что $X > L_p$, где L_p — диффузионная длина дырок:

$$I_{об} = q \Phi_0 T [1 - \exp(-\alpha d_{об})] / \hbar c / \lambda; \quad (2.2)$$

$$I_{диф} = q \Phi_0 T \alpha L_p \exp(-\alpha d_{об}) \hbar c / (1 + \alpha L_p) \lambda. \quad (2.3)$$

Надо учесть, что в (2.2) и (2.3) величина $d_{об}$ изменяется по мере заполнения потенциальной ямы. Эти уравнения справедливы только при условии, что зарядовый пакет много меньше максимального. Квантовый выход $\eta_f = \eta_{об} + \eta_{диф}$ можно записать как отношение фототока (или заряда) к поглощенному потоку излучения. Из (2.2) получим

$$\eta_{об} = 1 - \exp(-\alpha d_{об}), \quad (2.4)$$

а из (2.3)

$$\eta_{диф} = \alpha L_p \exp(-\alpha d_{об}) / (1 + \alpha L_p). \quad (2.5)$$

Пользуясь (2.4) и (2.5), проследим, как зависит квантовый выход η_f МОП-накопителя от длины волны излучения и коэффициента поглощения. Если ограничить рассмотрение кремнием, можно ввести единую шкалу для α и λ , как показано вдоль оси

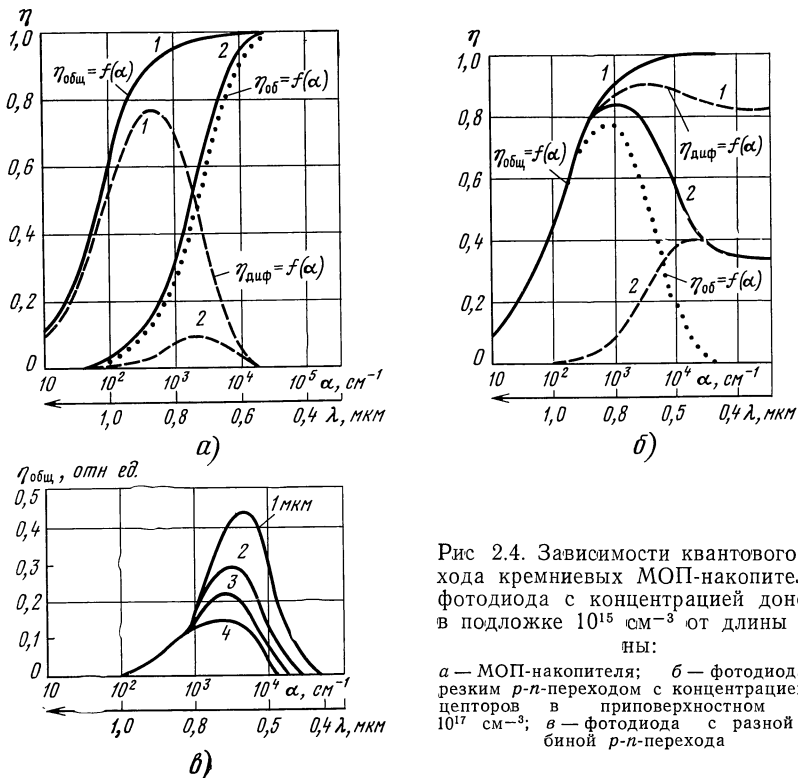


Рис 2.4. Зависимости квантового выхода кремниевых МОП-накопителя и фотодиода с концентрацией доноров в подложке 10^{15} см⁻³ от длины волны:

а — МОП-накопителя; б — фотодиода с резким p - n -переходом с концентрацией акцепторов в приповерхностном слое 10^{17} см⁻³; в — фотодиода с разной глубиной p - n -перехода

абсцисс на рис. 2.4,а, используя зависимость поглощения в кремнии от длины волны. Видно, что $\eta_{об}$ монотонно растет с увеличением поглощения, т. е. при переходе в коротковолновую часть спектра. Напротив, функция $\eta_{диф}$ имеет максимум, зависящий от соотношения глубины проникновения излучения, диффузионной длины носителей и толщины подложки. Напомним, что глубина проникновения излучения определяется как расстояние, при котором поток уменьшается в e раз по сравнению с падающим потоком, т. е. $x=1/\alpha$. При $1/\alpha > L_p$ увеличение диффузионной длины (времени жизни) носителей приводит к увеличению $\eta_{диф}$, максимум достигается, когда диффузионная длина становится равной или большей толщины квазинейтральной области: $L_p \geq (X - d_{об})$. На рис. 2.4,а приведены зависимости $\eta_{диф} = f(\alpha)$ для большого 10^{-6} с (кривая 1) и малого 10^{-9} с (кривая 2) времени жизни неосновных носителей. С увеличением времени жизни максимум растет и сдвигается в сторону меньших значений α . Сплошными линиями на рис. 2.4,б обозначены зависимости общего квантового выхода, штриховой линией — квантового выхода квазинейтральной области, точками — обедненной области. Снижение $\eta_{диф}$ после максимума в области сильного поглощения объясняется тем, что все меньше фотонов достигает квазинейтральной области. При $\alpha = 2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, что соответствует в кремнии $\lambda = 0,45 \text{ мкм}$, $\eta_{диф}$ обращается в 0, а общий квантовый выход становится равным $\eta_{об}$ и приближается к 1. Квантовый выход $\eta_{об}$ зависит от ширины области обеднения, т. е. от приложенного смещения подложки в случае поверхностного канала, или подложки и канала в случае объемного канала, а также от степени заполнения потенциальной ямы зарядом.

Квантовый выход фотодиодного накопителя можно записать в виде

$$\eta = \eta_{диф p} + \eta_{об} + \eta_{диф n}, \quad (2.6)$$

где $\eta_{диф p}$, $\eta_{диф n}$ — квантовые выходы квазинейтральной области p -типа у поверхности и n -типа в подложке соответственно. Квантовый выход области обеднения записывается аналогично (2.4) для МОП-накопителя, но с учетом двух границ x_p и x_n (рис. 2.3,б):

$$\eta_{об} = \exp(-\alpha x_p) - \exp(\alpha x_n) = \exp(-\alpha x_p) [1 - \exp(-\alpha d_{об})]. \quad (2.7)$$

Выражение (2.7) отличается от (2.4) множителем, отражающим вклад приповерхностной квазинейтральной области p -типа. Из-за этого множителя квантовый выход $\eta_{об}$ с ростом коэффициента поглощения не возрастает монотонно, как в случае МОП-накопителя, а достигает максимума и затем спадает до нуля (рис. 2.4,б). Положение максимума зависит от значения x_p при фиксированном смещении на фотодиоде. Концентрация примеси в p -области всегда больше концентрации примеси в n -подложке, область объемного заряда перехода, образующего фотодиод, распространяется в основном в подложку, поэтому можно приближенно считать $x_p \approx x_j$, где x_j — глубина p - n -перехода. На

рис. 2.4,в показано, как сдвигается функция $\eta_{об} = f(\alpha)$ при изменении глубины перехода с 4 до 1 мкм. Чем мельче p - n -переход, тем выше квантовый выход и сильнее сдвиг максимума в сторону коротких волн. Зависимость общего квантового выхода от поглощения может быть монотонной при больших временах жизни носителей или иметь максимум, если время жизни носителей мало (приведенные на рис. 2.3,б, кривые 1 и 2 соответствуют значениям времени жизни 10^{-6} с и 10^{-9} с). Из сравнения зависимости общего квантового выхода от длины волны МОП-накопителя и фотодиода можно сделать вывод, что первый предпочтительнее. Это справедливо, однако, только в длинноволновой части видимого диапазона. Коротковолновое излучение электрод МОП-накопителя интенсивно поглощает, и здесь предпочтительнее использовать фотодиод.

Если коэффициент пропускания T умножить на общий квантовый выход, получим чувствительность фотоячейки ФПЗС. На рис. 2.5 приведена относительная спектральная чувствительность $S(\lambda)$ кремниевого фотодиода с резким p - n -переходом глубиной 3 мкм и типичными значениями уровней легирования: концентрация доноров (подложка) 10^{15} и акцепторов 10^{17} см $^{-3}$ и времена жизни электронов 10^{-7} и дырок 10^{-5} с. Видно, что на длине волны 0,4 мкм чувствительность фотодиода остается достаточно высокой.

Выражения для квантовых выходов (2.4)—(2.7) были получены при условии малого изменения толщины обедненной области. Принципиальным отличием МОП-накопителя от фотодиода является изменение толщины области обеднения по мере заполнения потенциальной ямы зарядами. Для того чтобы учесть этот эффект, следует в (2.4)—(2.7) подставить зависимости $d_{об}$ от смещения и величины зарядового пакета, полученное сложное выражение аналитически не решается.

Способ ввода оптической информации с использованием фоточувствительного слоя позволяет расширить диапазон спектральной чувствительности ФПЗС в основном в области коротковолнового излучения. Описано применение люминофора [10], поглощающего в синей области спектра, а излучающего в зеленой. Невысокая разрешающая способность люминофорных слоев ограничивает их использование. Более перспективно, очевидно, нанесение на поверхность ФПЗС фоточувствительных слоев таких веществ, как халькогенидное стекло $ZnSe-Zn_{1-x}Cd_xTe$, гидрогенизированные кремний (α -Si:H) и карбид кремния (α -SiC:H). В этих слоях формируют фоторезисторы или фотодиоды, с которых сигнал электрически вводится в ФПЗС.

Наконец, существует способ ввода оптической информации с фотоэлект-

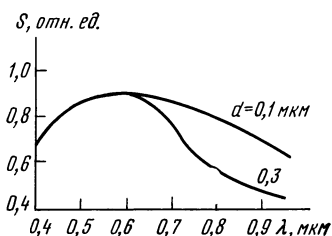


Рис. 2.5. Спектральная чувствительность кремниевого фотодиода с резким p - n -переходом

ронным преобразованием. В одном из вариантов способа используют электронно-оптический преобразователь (ЭОП), в котором оптически генерируемые электроны ускоряются и направляются на ФПЗС. Предпочтительно при этом применять ФПЗС с тонкой подложкой и вводить электроны с обратной стороны. Подобная конструкция обеспечивает не только спектральное преобразование, но и усиление более чем в 10^3 . Помещать, однако, кристалл ФПЗС в вакуумный прибор довольно сложно технологически, поэтому в последнее время все шире применяют вариант, представляющий гибридную сборку ЭОП ФПЗС (*бимодульный* прибор). В бимодульном приборе поток излучения попадает на поверхность входного волоконно-оптического окна, контактирующего с фотокатодом ЭОП. Фотозэлектроны, генерируемые фотокатодом, умножаются микроканальной пластиной, усиленное по яркости изображение, возникающее в результате на люминесцентном экране, переносится с помощью фокона (конусообразный волоконно-оптический канал) на поверхность матричного ФПЗС. При переносе размер изображения уменьшается в несколько раз. Бимодульная структура повышает чувствительность в области малых освещенностей на 3 ... 4 порядка.

В ряде ФПЗС предусматривается электрический ввод информации. Так, в ФПЗС с поверхностным каналом электрическим путем вводят фоновый заряд, заполняющий поверхностные ловушки и улучшающий эффективность переноса. Дополнительный входной ПЗС-регистр в матричных ФПЗС позволяет: вводить информацию о параметрах образа, с которым сравнивается изображение; кодировать изображение, искажая его путем добавления в фоточувствительные ячейки зарядов по определенной схеме, а затем восстанавливая; использовать ФПЗС как ЗУ емкостью в полкадра или кадр. В линейных ФПЗС предусматривают дополнительный регистр с электрическим входом для ввода единицы в начале считывания строки — таким путем можно наиболее просто и эффективно организовать счет строк.

2.2. Типы фоточувствительных приборов с зарядовой связью

За неполные 20 лет развития появилось такое множество разновидностей фоточувствительных приборов с переносом зарядов (ППЗ), что классификация их по типам стала затруднительна. Тем не менее можно выделить два основных признака классификации (рис. 2.6): *электронное сканирование* — по одной или двум координатам; *считывание информации* — последовательное или произвольное (с выборкой элемента либо набора элементов).

К основным признакам добавляются два дополнительных: *вид регистрируемого излучения* — видимое или тепловое; *конструкторско-технологическое решение* — интегральные или гибридные приборы.

Выбор именно этих признаков, разумеется, произволен, и, как нетрудно заметить, сама система признаков выглядит эклектич-

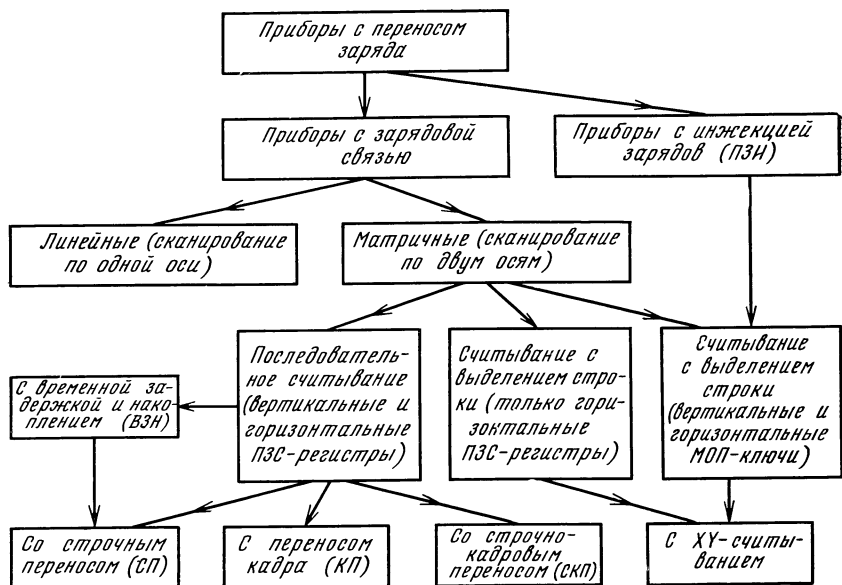


Рис. 2.6. Основные типы приборов с переносом заряда

ной, объединяя физический, схемотехнический и конструкторский подходы. Предлагаемая схема классификации, однако, отражает достаточно полно пеструю картину ФПЗС и позволяет показать, с одной стороны, взаимосвязь приборов различного типа, с другой — их различия. Например, одно- или двухкоординатный ФПЗС может быть и интегральным, и гибридным, предназначен как для видимого, так и для ИК-диапазона.

Одно- и двухкоординатные ФПЗС. В простейшем ФПЗС, представляющем собою сдвиговой регистр, функции накопления и переноса зарядов разделены во времени, но объединены пространственно, т. е. и накопление, и перенос осуществляются одной электродной системой. В течение некоторого времени на определенную фазу подают смещение высокого уровня, под электродами этой фазы накапливаются зарядовые пакеты. По истечении времени накопления включают тактирование фаз, и зарядовые пакеты направленно переносятся к выходному устройству. На рис. 2.7 показано схематически, как формируется ТВ-изображение линейным ФПЗС: *H* — непрозрачные полосы; *П* — прозрачные; *С* — полупрозрачные (серые); *ВУ* — выходное устройство. С помощью объектива на поверхность ФПЗС спроецирован тест-объект в виде полос с разной оптической плотностью — прозрачных, серых, непрозрачных. Высокий уровень смещения подан на вторую фазу. За время накопления в потенциальных ямах электродов второй фазы формируются зарядовые пакеты, пропорциональные распределению освещенности, созданному на поверхности формирователя: в элементе 2, на который спроеци-

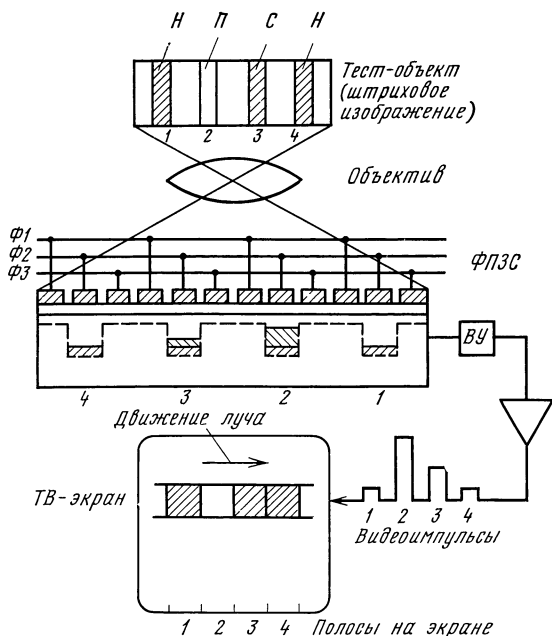


Рис. 2.7. Формирование телевизионного изображения с помощью ФПЗС

рована прозрачная полоса, зарядовый пакет будет большим; в элементе 3 (серая полоса) — меньше; в элементах 1 и 4 (непрозрачная полоса) находятся только термогенерированные носители. Естественно, что термогенерированные носители попадут во все потенциальные ямы и добавятся к информационному зарядовому пакету, созданному светом. Отношение заряда термогенерированных носителей ко времени накопления и есть *темновой ток*. После окончания периода накопления зарядов под электродами второй фазы потенциалы фаз переключают (см. гл. 1) и зарядовые пакеты сдвигаются к выходу регистра. Здесь зарядовые пакеты преобразуются в импульсы напряжения (тока), которые усиливают (чаще всего уже вне кристалла) и подают на видеоконтрольное устройство (ВКУ). Движение электронного луча в кинескопе ВКУ синхронизовано с движением зарядовых пакетов в ПЗС. Это означает, что тактовая диаграмма составлена таким образом, чтобы за время прочерчивания лучом одной строки все элементы регистра очистились от зарядов. Тогда на строке появятся точки, число которых будет строго равно числу элементов регистра, а яркость пропорциональна зарядовому пакету данного элемента, или, что то же самое, амплитуде импульса на выходе ПЗС. На рис. 2.7 показана картина на экране ВКУ, соответствующая полосам спроецированного на фоточувствительный ПЗС тест-объекта. Строго говоря, только такой ФПЗС является *однокоординатным прибором*, в котором перенос происхо-

дит вдоль одной оси. Во всех прочих типах ФПЗС имеет место перенос по двум осям координат, хотя по одной из них переносов может быть очень много, а по другой — не более одного-двух. Однако под *электронным самосканированием* понимают процесс многократного последовательного переноса. Это позволяет разделять ФПЗС на однокоординатные (линейные) и *двухкоординатные* (матричные) приборы. Для того чтобы сформировать двумерное изображение линейным ФПЗС приходится по второй оси, перпендикулярной направлению переноса, создавать механическое перемещение (*механическое сканирование*): сдвигать изображение перпендикулярно регистру или регистр двигать относительно изображения. Скорость движения электронного луча на ВКУ по-прежнему должна быть синхронизована со скоростью выведения зарядовых пакетов из регистра, а скорость смены кадров (кадровая частота) — со скоростью механического движения.

Линейные ФПЗС находят чаще всего применение там, где уже есть механическое сканирование — при считывании движущейся перфоленки, на борту самолета или любого другого перемещающегося устройства.

Двумерное изображение с помощью ПЗС можно сформировать и без механического сканирования, в результате электронного сканирования по обеим осям. Для этого надо создать набор из линейных ФПЗС, образовав тем самым двухкоординатный ПЗС — двумерную матрицу фоточувствительных элементов или матричный ФПЗС. Простейший матричный ФПЗС, содержащий десять линейных фоточувствительных регистров по десять элементов, показан на рис. 2.8. Каждый фоточувствительный регистр соединен с элементом сдвигового регистра, служащего для выво-

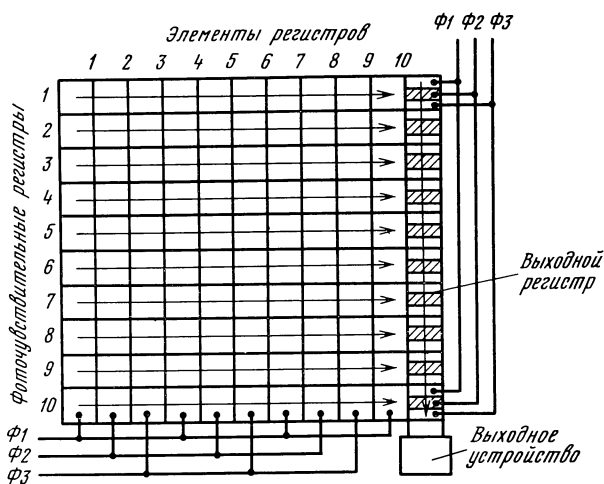


Рис 2.8. Простейший матричный ФПЗС, содержащий 1010 элементов

да зарядовых пакетов из матрицы. Этот выходной сдвиговый регистр не является фоточувствительным и выполняет только функции переноса. Изображение с помощью объектива проецируют на поверхность матрицы (выходной регистр закрыт непрозрачным экраном). После того как в элементах фоточувствительных регистров накопились зарядовые пакеты, их переносят одновременно во всех регистрах, например вправо, как показано на рис. 2.8. После одного такта переноса крайние правые зарядовые пакеты перетекут в подготовленные потенциальные ямы выходного сдвигового регистра, скажем, под электроды второй фазы. Все элементы сдвигового регистра оказываются заполненными. Приняв зарядовые пакеты, выходной регистр начинает переносить их на выход, пока полностью не очистится. Только затем в него перетекут следующие заряды из фоточувствительных регистров, и цикл переноса их на выход начнется заново. Эти процессы повторяются, пока не очистятся все фоточувствительные регистры и матрица окажется готовой к новому такту накопления.

До сих пор рассматривалось последовательное перемещение зарядовых пакетов из одной потенциальной ямы в другую, пока заряд не будет преобразован выходным устройством в импульс напряжения или тока. Между тем можно считать без многочисленных переносов — *методом зарядовой инъекции*. Приборы, в которых используется этот метод, называются соответственно *приборами с зарядовой инъекцией* (ПЗИ). Суть метода заключается в том, что при снятии с электрода МОП-емкости обедняющего смещения емкость возвращается в равновесное термодинамическое состояние, потенциальная яма исчезает, носители заряда больше не удерживаются электрическим полем и диффундируют в подложку, постепенно рекомбинируя с носителями противоположного знака. Измеряя протекающий в результате этого ток подложки, можно судить о величине зарядового пакета. Если набрать массив из МОП-емкостей и поочередно считывать в моменты t_1, t_2, \dots, t_n с них зарядовые пакеты, то изменение тока подложки во времени представляет информацию не только о величине зарядового пакета в данной емкости, но и о координате емкости, так как в момент t_1 ток будет соответствовать зарядовому пакету емкости 1, в момент t_2 — емкости 2 и т. д.

Одномерный ПЗИ представляет линейку МОП-емкостей, которые сначала подсоединяют с помощью МОП-ключей к опорному источнику и затем отсоединяют, оставляя под плавающим потенциалом в состоянии обеднения. В результате накопления зарядов в потенциальных ямах плавающий потенциал МОП-емкостей изменится пропорционально величине зарядовых пакетов. С помощью других ключей МОП-емкости поочередно соединяют с подложкой, осуществляя тем самым инъекцию зарядов. В одномерном ПЗИ МОП-емкости могут располагаться в принципе на любом расстоянии друг от друга, поскольку зарядовая связь и перенос зарядов отсутствуют, по этой же причине качество поверхности не играет роли.

В двумерных ПЗИ необходим, по крайней мере, один перенос зарядового пакета. Элемент ПЗИ-матрицы образован двумя МОП-емкостями, соединенными зарядовой связью. Один из электродов каждой пары присоединен к горизонтальной шине (строка), другой — вертикальной (столбец), как показано на рис. 2.9. Если подать обедняющее смещение, скажем, на столбцы, под присоединенными к ним электродами можно накопить зарядовые пакеты. Зарядовые пакеты можно также перемещать из-под столбцовых электродов в потенциальные ямы заряженных до плавающего потенциала строчных электродов (и обратно), а затем поочередно, закорачивая строчные электроды на подложку, считывать информацию. Необходимость двух электродов в двумерном ПЗИ очевидна. Если бы присутствовали одни столбцовые электроды, то считать удалось бы только весь столбец, зарядовые пакеты смешались. Перевод зарядовых пакетов под строчные электроды позволяет считывать информацию в точке пересечения строки и столбца.

В первых конструкциях ПЗИ считывание осуществлялось непосредственно в подложку, что оказалось неудачным в основном из-за инерционности и перекрестного влияния соседних элементов, связанных с процессами диффузии и рекомбинации носителей. В изображенном на рис. 2.9 ПЗИ используется современный метод *параллельного считывания*. Ключи K_1 — K_4 присоединяют все столбцы к источнику опорного напряжения и затем отключают, оставляя под плавающим потенциалом. На все строчные электроды подано при этом обедняющее смещение, большее, чем на

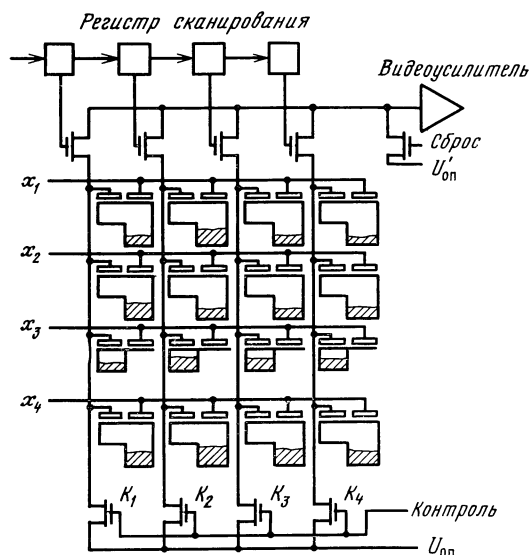


Рис. 2.9. Матрица ПЗИ, содержащая 4×4 ячеек со считыванием по методу параллельной инжекции

столбцовые, так что носители заряда скатываются в потенциальные ямы под строчными электродами. Затем на выбранной строчной шине (x_3 на рис. 2.9) смещение снижают до нуля, и зарядовые пакеты из-под всех строчных электродов этой шины перетекают под столбцовые электроды. Плавающий потенциал столбцовой шины в результате изменится на значение, пропорциональное зарядовому пакету, хранившемуся под тем строчным электродом выбранной строки, который связан со столбцовым электродом данной шины. Столбцы поочередно подключаются (с помощью регистра сканирования и МОП-ключей для считывания информации $K'_1—K'_4$) к выходному усилителю. Основным недостатком ПЗИ — большая емкость узла считывания, равная примерно емкости столбцовой шины. Именение плавающего потенциала на столбцовой шине представляет частное от деления малого зарядового пакета на большую емкость шины, т. е. полезный сигнал будет очень небольшим и трудно выделяемым среди тактовых помех. Достоинствами ПЗИ являются меньшее, чем в ПЗС, влияние поверхности и возможность считывания выбранной строки (*строчная адресация*).

Рассмотрим основные типы линейных и матричных ФПЗС, следуя классификационной схеме рис. 2.6.

Линейные ФПЗС. На рис. 2.10,а показана конструкция ФПЗС, в которой области накопления и переноса не разделены пространственно. Достоинство ФПЗС — простота, недостаток — смазывание изображения при считывании из-за того, что к зарядовым пакетам данной строки могут добавляться носители, генерируемые светом за время накопления следующей строки. Избавиться от этого недостатка можно, перекрывая тем или иным способом поток излучения на время считывания. Уменьшить смазывание удастся, если время считывания сделать много меньше времени накопления. Один из первых отечественных линейных ФПЗС на 512 элементов, разработанный в 1974 г., был выполнен в виде простейшего трехфазного сдвигового регистра с поверхностным каналом и металлическими электродами. Оптическая информация вводилась в зазоры между электродами и частично сквозь сами электроды, так как толщина слоя металла была мала. Для получения изображения без смазывания применялась импульсная засветка.

Радикальным решением проблемы смазывания изображения, формируемого линейным ФПЗС, явилось пространственное разделение областей накопления и переноса. В конструкции такого ФПЗС (рис. 2.10,б) содержатся линейка фоточувствительных ячеек, затвор параллельного переноса накопленных зарядов из фотоячеек в сдвиговый регистр (разрешающий затвор) и защищенный от света регистр с выходным устройством. Для разделения фотоячеек и накопленных зарядовых пакетов на пути переноса из ячеек в элементы регистра используются стоп-канальные области. В течение времени накопления разрешающий затвор закрыт, на фотозатвор, общий для всех ячеек, подано обедняющее

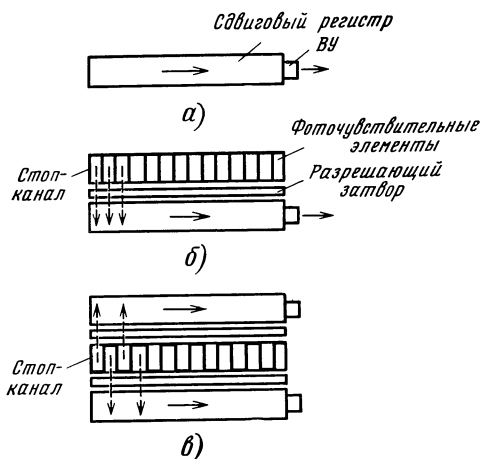


Рис. 2.10. Типы линейных ФПЗС:

а — без разделения областей накопления и переноса; б — с отдельными фоточувствительными элементами и сдвиговым регистром; в — с отдельными фоточувствительными элементами и двумя сдвиговыми регистрами

смещение, и в фотоячейках накапливаются заряды. Сдвиговой регистр в этот период в принципе может не работать, но обычно он включен все время и считывает либо предыдущую информацию, либо темновой ток. По окончании времени накопления на разрешающий затвор подается открывающий импульс и зарядо-

вые пакеты из каждой фотоячейки параллельно перетекают в соответствующий элемент сдвигового регистра, точнее, под принимающий электрод той фазы, на которой в этот момент находится высокий уровень смещения. Пока длится следующий период накопления, все зарядовые пакеты считываются сдвиговым регистром, так что к новому включению разрешающего затвора регистр пуст (строка считана) и готов к приему и считыванию новой строки. Время считывания в такой конструкции может равняться времени накопления, т. е. частота работы сдвигового регистра снижается. Дальнейшее снижение частоты и уменьшение числа переносов обеспечивает двухрегистровая конструкция (рис. 2.10, в).

Стоп-канальные области в двухрегистровом ФПЗС выполнены таким образом, что четные фотоячейки передают накопленные заряды в один из регистров, а нечетные — в другой. После окончания периода накопления открываются два разрешающих затвора, информация переходит в сдвиговые регистры и считывается за время следующего периода накопления. Тактовые диаграммы работы сдвиговых регистров и выходных затворов строят так, чтобы в выходное устройство поочередно попадали зарядовые пакеты из обоих регистров.

Большинство современных линейных ФПЗС выпускаются с двумя сдвиговыми регистрами. Примерами могут служить первые отечественные ФПЗ на 512 элементов разложения и выпускаемые в настоящее время ФПЗС типов К1200ЦЛ2; К1200ЦЛ5; К1200ЦЛ6; CCD-133 и CCD-143 (фирмы Fairchild, США); μ рD-792 (фирмы NEC, Япония) и др. [10].

Достоинство линейных ФПЗС с двумя регистрами заключается в уменьшении числа переносов и снижении тактовой частоты. Однако на практике трудно устранить различия в характеристиках СР и добиться полной их идентичности. Кроме того, *мультиплексирование* (т. е. поочередное подключение регистров) на

высоких частотах представляет сложную схемотехническую задачу. Для того чтобы обеспечить большую свободу подстройки, регистры выполняют с отдельными выходными затворами и выходными устройствами (К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6).

Иногда разработчики отказываются от двухрегистровой конструкции и оставляют один считывающий регистр, обеспечивая высокую эффективность переноса с помощью отработанной технологии. Это позволяет организовать наиболее простым образом *антиблуминг* без потери разрешающей способности. Считывающий регистр располагают с одной стороны фотоячеек, антиблуминговый сток — с другой (рис. 2.11,а). Работа антиблумингового устройства поясняется на рис. 2.11,б. Сток избыточных зарядов представляет собою длинный p - n -переход, смещаемый в запиорном направлении. Сток отделен от фотоячеек затвором, задающим экспозицию, при превышении которой начинается перелив избыточных зарядов. Поскольку смещение на этом затворе поддерживается меньшим, чем потенциал накопления, возникает потенциальный барьер U_{AB} , через который проходят только избыточные заряды. В двухрегистровых ФПЗС осуществить антиблуминг таким простым способом нельзя. Для подавления растекания зарядов приходится применять сложные конструктивно-технологические решения, например создание вертикального антиблумингового стока (см. § 2.3).

Стремление увеличить разрешающую способность линейного ФПЗС привело к разработке приборов с четырьмя сдвиговыми регистрами (рис. 2.12,а). Четные фотоячейки считываются двумя

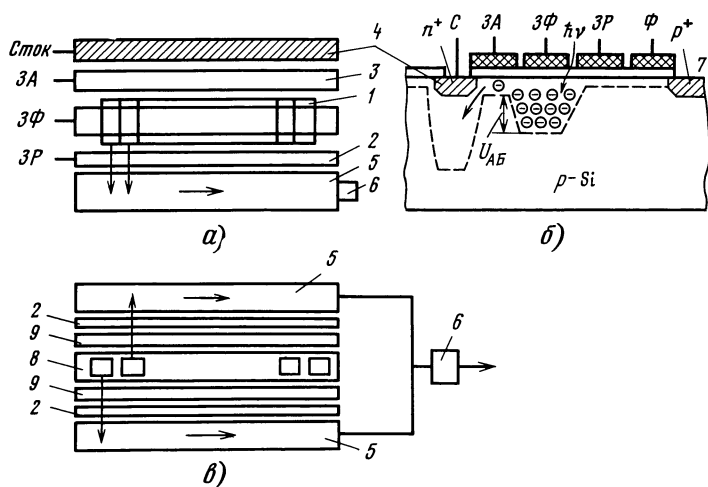
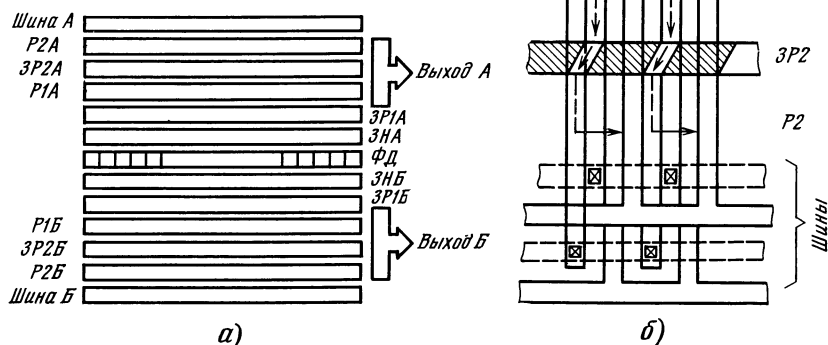


Рис. 2.11. Конструкции линейных ФПЗС.

а — с одним сдвиговым регистром; б — антиблуминговое устройство; в — с фотодиодами и МОП-накопителями: 1 — фоточувствительные МОП-элементы с фотозатвором ЗФ; 2 — разрешающий затвор ЗР; 3 — затвор антиблуминга ЗА; 4 — диод для стока избыточных носителей; 5 — сдвиговый регистр; 6 — выходное устройство; 7 — стоп-канал; 8 — фотодиоды, 9 — МОП-накопители

Рис. 2.12. Структура четырехрегистрового линейного ФПЗС:

а — общий вид; *б* — фрагмент нижней части, *ФД* — фотодиоды, *ЗН* — накопительный затвор; *ЗР* — разрешающий затвор; *Р* — сдвиговый регистр



верхними регистрами, нечетные — двумя нижними (на рис. 2.12,6 показана только нижняя половина ФПЗС). Видно, что половина зарядовых пакетов остается во внутреннем регистре, так как дальнейший путь им преграждают стоп-канальные области (в форме параллелограмма — заштрихованные области), вторая половина зарядовых пакетов проходит во внешний регистр. Создание четырехрегистровых ФПЗС требует значительного усложнения технологии, и описаны только экспериментальные разработки подобных ФПЗС [10].

Характеристики линейного ФПЗС во многом определяются конструкцией фотоячеек. Высокую зарядовую емкость имеет МОП-накопитель, но из-за поглощения в электроде снижается чувствительность, особенно в коротковолновой области спектра. По этой причине в современных линейных ФПЗС преимущественно используют фотодиоды. Отсутствие верхнего электрода в фотодиоде позволяет значительно повышать чувствительность прибора. Простейшая конструкция линейного ФПЗС, в которой МДП-емкости просто заменены *p-n*-переходами, обладает, однако, низким отношением сигнал-шум. Это обстоятельство связано с тем, что удельная емкость *p-n*-перехода меньше, нежели МОП-емкости, и, следовательно, полезный сигнал в сравнении с темновыми токами будет меньше. Недостаток устраняется с помощью добавления к фотодиодам накопительных МОП-емкостей. Структура прибора показана на рис. 2.11,в. К линейке фотодиодов с двух сторон примыкают МОП-емкости, отделенные разрешающими затворами от соответствующих сдвиговых регистров. Возникающие под действием света электронно-дырочные пары разделяются в поле *p-n*-переходов, и носители накапливаются в потенциаль-

ных ямах МОП-емкостей. При открывании разрешающих затворов происходит параллельный перенос накопленных зарядов в сдвиговые регистры. В период считывания информации регистрами разрешающие затворы закрыты, и в системе фотодиод — МОП-емкость накапливается следующая строка. Комбинация фотодиод — МОП-емкость в сравнении с обычными МОП-накопителями дает заметный выигрыш — выходной сигнал в зеленой области возрастает примерно в 2 раза, а в синей — до 3 ... 3,5 раза.

Матричные ФПЗС. Подобно линейным ФПЗ в матричных области накопления и считывания могут быть совмещены или разделены, но так как матричные ФПЗС сложнее линейных, определено несколько вариантов компоновки разделенных областей накопления и считывания.

Матрицы со строчным переносом (СП). В таких матрицах области накопления и считывания совмещены (рис. 2.13, а). Матрицы предназначены для работы в малокадровом режиме, когда можно применить фотозатвор, или сделать время накопления много больше времени считывания. Считывание двух-

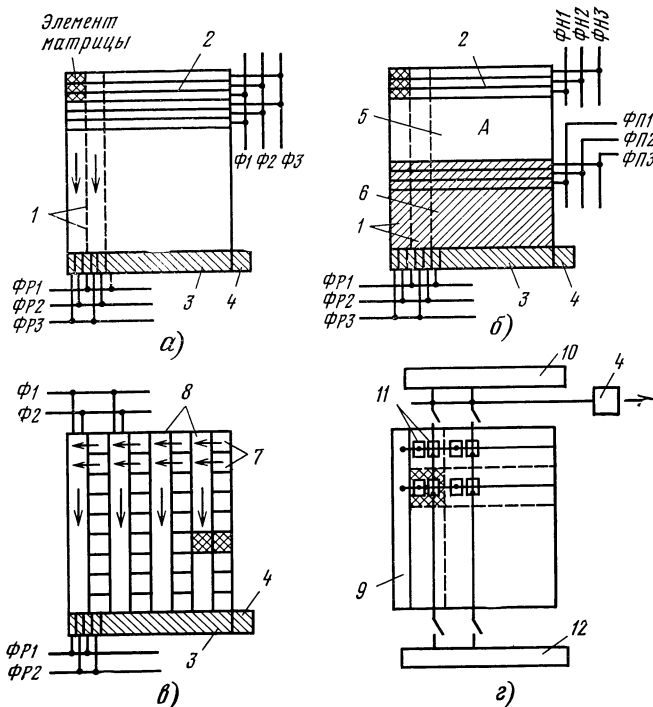


Рис. 2.13. Матричные ФПЗС.

а — матрица с регулярной структурой без разделения областей накопления и переноса; б — матрица с переносом кадра; в — матрица со строчно-кадровым переносом; г — прибор с инжекцией заряда; 1 — стоп-каналы; 2 — электроды; 3 — сдвиговый выходной регистр; 4 — выходное устройство; 5 — область накопления; 6 — область памяти; 7 — светочувствительные элементы; 8 — сдвиговые регистры; защищенные от света; 9 — строчный регистр; 10 — столбцовый регистр; 11 — двойные МОП-емкости; 12 — опорное напряжение

координатного массива происходит построчно в выходной сдвиговый регистр и далее в выходное устройство. Конструкция и управление СП-матриц наиболее просты в сравнении с другими типами матриц. К СП-матрицам относятся *ФПЗС с временной задержкой и накоплением* (ВЗН). Эти приборы занимают промежуточное положение между линейными и матричными ФПЗС, объединяя достоинства и тех, и других. По сути дела, ВЗН ФПЗС можно рассматривать как множество линейных ФПЗС, объединенных на одном кристалле в простейшую матрицу с регулярной структурой элементов. В режиме ВЗН необходимым условием является перемещение матрицы или объекта относительно друг друга в направлении, перпендикулярном строкам.

Если фрагмент изображения совмещен, например, с первой строкой матрицы ВЗН и на нее подан потенциал накопления, то в течение времени, определяемого длительностью тактового импульса, будет происходить накопление заряда от данного фрагмента. Затем потенциал накопления переключают на вторую строку, потенциальные ямы переместятся под эту строку, и если скорость движения изображения синхронна со скоростью движения зарядовых пакетов, то в следующий момент времени проекция фрагмента изображения опять совпадет с потенциальными ямами, но уже находящимися под электродами второй строки. Заряд, накопленный под электродами второй строки в течение действия тактового импульса, будет соответствовать тому же фрагменту изображения. Далее зарядовые пакеты перемещаются под электроды третьей строки синхронно с изображением, и снова накопленные заряды соответствуют тому же фрагменту. Этот процесс будет повторяться столько раз, сколько строк содержится в матрице по направлению движения.

Данный принцип регистрации изображения требует жесткой стабилизации движущегося объекта в пространстве и высокой точности регистрации линейной скорости объекта (необходимо точное совпадение вектора скорости с вектором перемещения зарядовых пакетов как по абсолютной величине, так и по углу, в противном случае будет происходить искажение изображения).

Использование временной задержки и накопления позволит резко улучшить отношение сигнал-шум матриц ВЗН и, следовательно, реализовать высокую чувствительность. В зависимости от преобладающего механизма шумов увеличение отношения сигнал-шум может составить $M^1 \cdot 2 \dots M$ раз, где M — число элементов в столбце (число строк в матрице).

Современные матрицы ВЗН строятся по *принципу секционирования*. В [12] описана матрица ВЗН, содержащая 128 строк по 36 элементов в каждой, разделенная на четыре секции с отдельным фазовым питанием. В формировании видеосигнала могут участвовать 1—4 секций. Если не все секции работают, то заряды неиспользуемых секций выносятся в противоположном направлении. Так осуществляется электронная регулировка чувствительности и расширяется динамический диапазон. Примерами отече-

ственных ВЗН-матриц служат приборы типа БК1200ЦМЗ (см. гл. 4). Одно из основных достоинств ВЗН-матриц — возможность гибридной сборки их в *суперлинейки*, число элементов которых достигает десятков тысяч.

Матрицы с кадровым переносом (КП). В КП-матрицах к фоточувствительной области (секция накопления) примыкает экранированная от света область хранения и построчного считывания (секция памяти). В секции накопления (область А на рис. 2.13,б) происходит формирование зарядовых пакетов, обычно в течение полукадра. Затем зарядовые пакеты быстро сдвигаются в секцию памяти. В течение следующего полукадра в освободившейся фоточувствительной области формируется массив новых зарядовых пакетов, а из секции памяти информация построчно переводится в выходной сдвиговый регистр и далее в выходное устройство.

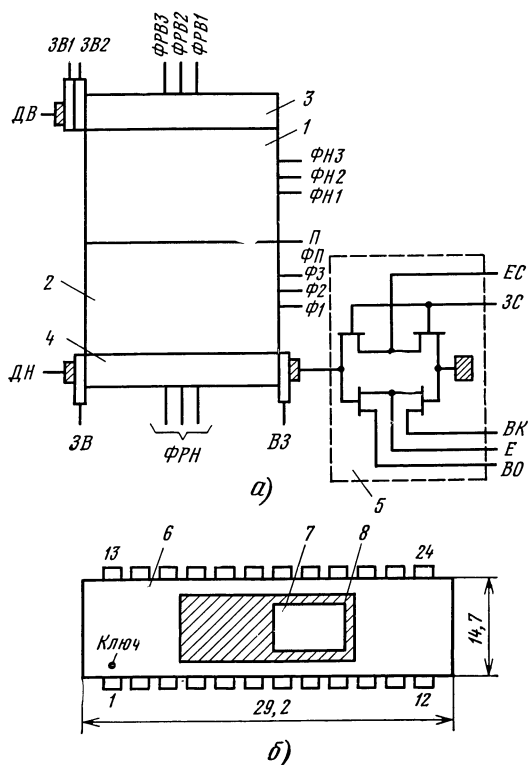


Рис. 2.14. Среднеформатный ФПЗС:

а — структурная схема; б — вид на прибор сверху; 1 — секция накопления; 2 — секция памяти; 3 — верхний (входной) сдвиговый регистр; 4 — нижний (выходной) регистр; 5 — выходное устройство; 6 — керамическое основание корпуса; 7 — оптическое окно; 8 — металлическая крышка. ФН, ФП, ФРВ, ФРН — фазы секции накопления памяти, верхнего и нижнего регистров соответственно; ДВ, ДН — входные диоды; ЗВ1, ЗВ2, ЗВ — входные затворы; ВЗ — выходной затвор; ЗС — затвор транзистора сброса; П — подложка; ВО — выход видеосигнала (основной); ВК — выход компенсационный; Е и ЕС — питание усилительных транзисторов и транзисторов сброса

Работу КП-матрицы в ТВ-режиме рассмотрим на примере среднеформатного ФПЗС типа К1200ЦМ1, содержащего 288×230 элементов. Структурная схема матрицы приведена на рис. 2.14. Изображение с помощью оптической системы проецируется на область накопления матрицы. Для реализации чересстрочной развертки в течение нечетных полей (полукадров) потенциал накопления ($-12 \dots -15$ В) подают, например, на электроды первой фазы ФН1, а в течение четных — на электроды второй ФН2 фазы. Во время кадрового гасящего импульса осуществляется параллельный перенос накопленных зарядов в секцию памяти, для чего тактируют электроды обеих областей в соответствии с тактовой диаграммой рис. 2.15. По окончании переноса в фоточувствительной секции начинается новый цикл накопления, а из секции памяти производится параллельный сдвиг зарядов в выходной регистр с частотой строк. В результате секция памяти очищается от зарядов как раз за время полукадра, после чего снова

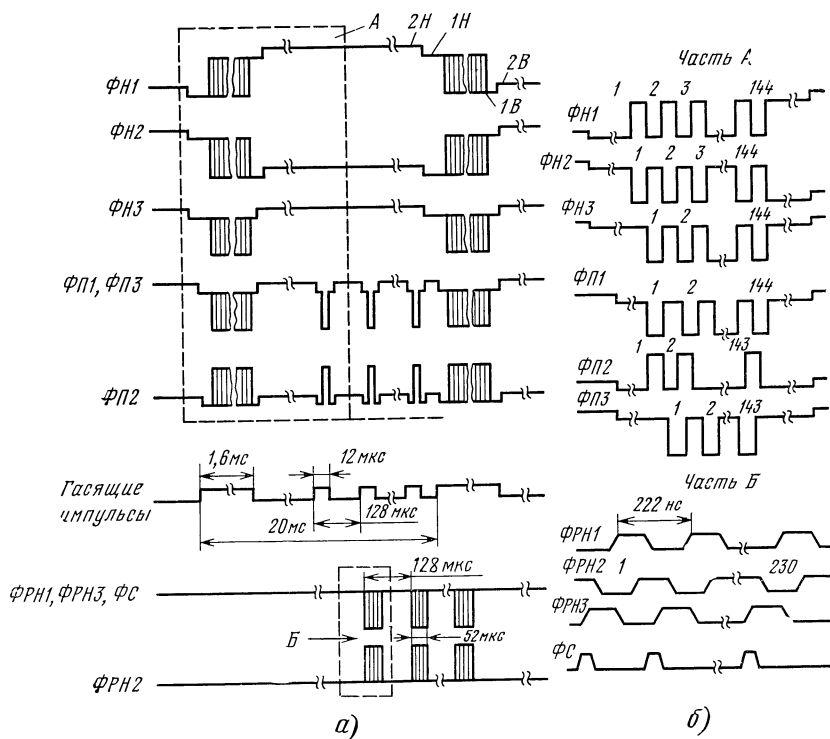


Рис. 2.15. Тактовая диаграмма работы среднеформатной матрицы на 288×230 элементов:

а — полная диаграмма; *б* — развертки отдельных частей диаграммы, ФН1, ФН2, ФН3 — импульсы на фазах секции накопления; ФП1, ФП2, ФП3 — на фазах секции памяти; ФРН1, ФРН2, ФРН3 — нижнего (выходного) регистра; ФС — импульсы на затворах транзистора сброса, 1Н, 2Н — низкие уровни фазового напряжения (0–10 В для 1Н, 5В–8 В — для 2Н); 1В, 2В — высокие уровни фазового напряжения (–8 В–30 В — для 1В, –8 В–25 В — для 2В)

сбрасывают заряды из фоточувствительной области. Сдвиг каждой строки из секции памяти в выходной регистр происходит во время строчного гасящего импульса. В течение прямого хода строчной развертки зарядовые пакеты последовательно выводятся из выходного регистра через выходное устройство на внешний видеоусилитель.

Матрицы со строчно-кадровым переносом (СКП). Вертикальные фоточувствительные области в них чередуются с экранированными от света регистрами считывания (рис. 2.13, в). В отличие от КП-матрицы область накопления как бы разрезана на вертикальные столбцы, между которыми вставлены сдвиговые регистры. Изображение в СКП-матрице проецируют на весь кристалл, хотя фоточувствительной является только часть площади, не занятая сдвиговыми регистрами. Зарядовые пакеты, накопленные в фотоячейках, одновременно переносятся в соседние элементы вертикальных регистров считывания и пока копится следующий кадр или полукадр выносятся в горизонтальный выходной регистр и далее в выходное устройство. Структура фрагмента СКП-матрицы показана на рис. 2.16. Фотоячейки разделены стоп-канальными областями и управляются общим фотозатвором, т. е. являются МОП-накопителями. Между экранированным регистром считывания, в данном случае четырехфазным, и фотоячейками расположена барьерная область, формируемая ионным легированием. Назначение этой области — создать потенциальный барьер, препятствующий проникновению накапливающихся в фотоячейках зарядов в регистр. Перетекание зарядовых пакетов осуществляется только в том случае, когда с фотозатвора снят потенциал накопления, а на принимающие электроды прилегающих элементов регистра считывания подано обедняющее смещение высокого уровня. В матрице, работающей без чересстрочной развертки, накопление происходит в течение полного времени кадра, затем на время кадрового гасящего импульса потенциал на-

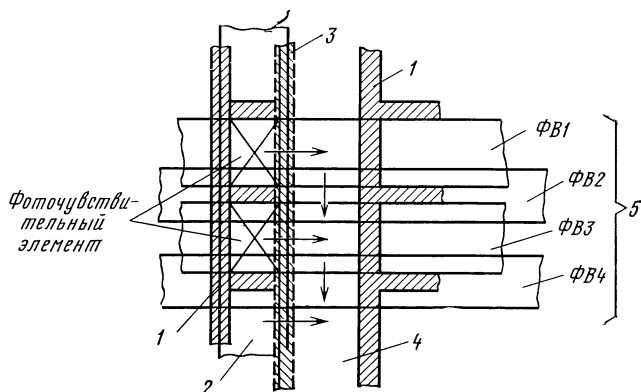


Рис. 2.16 Элемент строчно-кадровой матрицы:

1 — стоп-канал, 2 — фотозатвор; 3 — потенциальный барьер; 4 — канал переноса; 5 — фазы вертикального сдвигового регистра (четырёхфазного)

копления с фотозатвора снимается. Зарядовые пакеты перетекают в потенциальные ямы под электродами первой и третьей фаз регистра считывания. Затем фотозатвор вновь переключают в режим накопления нового кадра, а информация считывается вертикальными регистрами. Для осуществления чересстрочной развертки несколько изменяют тактовую диаграмму и подают смещение высокого уровня поочередно на принимающие электроды первой и третьей фаз. Накопленный в фотоячейке заряд перетекает через барьерную область в потенциальную яму под электрод первой фазы (четный полукадр) или третьей фазы (нечетный полукадр).

По сравнению с КП-матрицами, где фотоячейкой служит МОП-накопитель, в СКП-матрицах открываются большие возможности выбора структуры фотоячейки: ею может быть МОП-накопитель, фотодиод, фоторезистор. Наиболее часто используются фотодиодные ячейки, позволяющие улучшать чувствительность в синей области. Надо помнить, что в СКП-матрице около половины фоточувствительной области отдано под вертикальные регистры считывания, поэтому площадь фотоячеек в СКП-матрице мала и увеличение зарядовой емкости становится проблемой. Одним из путей увеличения зарядовой емкости СКП-матриц может служить *режим накопления поля*. Когда СКП-матрица работает в обычном режиме кадрового накопления, четные фотоячейки считывают в одном полукадре, а нечетные — в другом. В режиме накопления поля в конце каждого полукадра считываются все фотоячейки. Тактовая диаграмма вертикальных регистров построена так, чтобы зарядовые пакеты из фотоячеек каждых двух соседних строк объединялись в одной потенциальной яме, причем в полукадрах объединяют разные пары строк, обеспечивая чересстрочную развертку. В режиме накопления поля зарядовая емкость удваивается, так как складываются зарядовые пакеты двух фотоячеек.

Любопытным конструктивным вариантом являются матрицы, которые можно обозначить СКП+КП. В них к обычной СКП-матрице добавлена секция памяти [10]. Во время накопления носители, генерируемые длинноволновыми фотонами глубоко в подложке, попадают, диффундируя, в вертикальные регистры. В результате наблюдается «смаз» телевизионного изображения, похожий на растекание при локальных пересветках. В СКП+КП-матрице пока информационный сигнал копится в фотоячейках, сигнал смаза накапливается в вертикальных регистрах. Перед тем как передать информационные зарядовые пакеты из фотоячеек в вертикальные регистры, последние очищают. Для этого вертикальные регистры фоточувствительной секции и секции памяти тактируют с высокой частотой. Накопленные заряды смаза сбрасывают в выходной горизонтальный регистр и затем выводят во внешнюю цепь. Информационные зарядовые пакеты переносят в очистившиеся вертикальные регистры, а затем в секцию памяти. Из секции памяти информация обычным образом

построчно считывается, за это время происходит накопление следующего кадра.

Последовательное и произвольное считывание. Сам принцип зарядовой связи множества элементов, будь то линейный или матричный ФПЗС, крайне затрудняет произвольную выборку. Затрудненность или невозможность произвольной выборки и большое число последовательных переносов — существенные недостатки любого ПЗС, компенсируемые тем неоценимым достоинством, которое приобретает взамен в ПЗС, а именно малой выходной емкостью и, следовательно, низким уровнем шумов. Отказ от последовательного поэлементного считывания и переход к произвольному позволил в ФПЗИ осуществить выборку элемента, но ценою резкого увеличения выходной емкости, причем чем больше элементов в ФПЗИ, тем больше выходная емкость. Таким образом происходит обмен недостатками (или достоинствами) по принципу: последовательное считывание и малая выходная емкость или произвольное (координатное) считывание и большая выходная емкость. В линейных приборах эта альтернатива не играет большой роли, подавляющее большинство линейных приборов являются ФПЗС. В матричных приборах приходится выбирать между ФПЗС и координатными матрицами (ХУ-матрицы). До последнего времени пальму первенства уверенно держали матричные ФПЗС именно благодаря малой выходной емкости. Сейчас все шире разрабатывается компромиссный вариант — ХУ-матрицы с ограниченно-произвольным считыванием, в которых можно произвольно выделить не элемент, а строку. Истинная ХУ-матрица вне зависимости от того, какой элемент находится на пересечении строк и столбцов (связанные МОП-емкости, фотодиоды или фототранзисторы), управляется по обеим осям цифровыми регистрами, состоящими из МОП-ключей, что позволяет выбирать (считывать) один элемент, но выходная емкость шины считывания при этом велика. В новом классе ХУ-матриц цифровые регистры управляют только строками, а по столбцам считывание производится аналоговым ПЗС-регистром, число элементов которого соответствует числу столбцов. С помощью цифрового регистра можно выбрать нужную строку, но все ее элементы будут считываться аналоговым ПЗС-регистром последовательно. В обмен на такое ограничение приобретается малая выходная емкость ПЗС-регистра. Итак, в матричных фоточувствительных приборах вырисовываются три класса (рис. 2.6):

ФПЗС-матрицы: много переносов, произвольная выборка неосуществима, выходная емкость мала;

ХУ-матрицы с цифровыми регистрами: мало переносов, осуществима произвольная выборка элемента, выходная емкость велика;

ХУ-матрицы с цифровым и аналоговым ПЗС-регистрами: среднее число переносов, осуществима произвольная выборка строки, выходная емкость мала.

До последнего времени ФПЗС-матрицы являлись основными представителями фоточувствительных приборов с переносом зарядов.

Фоточувствительные ХУ-матрицы с цифровыми регистрами не нашли широкого применения в телевизионной технике из-за большой выходной емкости и неизбежно возникающих при этом неприятностях — большого *геометрического шума* (обусловленного разбросом емкостей столбцовых шин), трудности выделения информационного сигнала на фоне тактовых помех, высоких флуктуационных шумов. Фоточувствительные ФПЗИ с цифровыми регистрами имели число элементов 100×100 . Переход к большему числу элементов оказался возможным при замене горизонтального цифрового регистра аналоговым. Появились ФПЗИ с числом элементов 248×244 , 388×244 и 416×290 [10]. В ФПЗИ тем не менее остался существенный недостаток — необходимость выделения времени на инжекцию зарядов в подложку; вероятно, этим объясняется ограниченность производства ФПЗИ — они выпускаются двумя фирмами [10]. Координатные ХУ-матрицы с аналоговыми ПЗС-регистрами и фотодиодными (или фототранзисторными) ячейками практически полностью вытеснили ФПЗИ.

ХУ-матрица с «выметанием» заряда [6, с. 49] напоминает СКП-матрицу, поскольку в ней сохранены вертикальные ПЗС-регистры. Они выполнены очень узкими и управляются напряжением с малой амплитудой. Ячейка матрицы состоит из фотодиода и поликремниевго затвора, который контролирует передачу зарядового пакета из фотодиода в регистр и одновременно является тактовым электродом регистра. Все затворы ячеек строки объединены шиной. Строчные шины коммутируются вертикальным цифровым регистром. Во время обратного хода строчной развертки вертикальный цифровой регистр выбирает одну из строк, затворы передачи выбранной строки открываются, и заряды из фотодиодов переходят в вертикальные ПЗС-регистры. При этом зарядовый пакет, поступив из фотодиода в регистр, не обязательно остается в прилегающей части регистра, а может растекаться по регистру (поскольку регистр свободен от других зарядовых пакетов). Зарядовая емкость вертикального ПЗС-регистра оказывается достаточно большой, даже если его ширина уменьшена до минимума, допускаемыми фотолитографическими нормами. Из вертикальных ПЗС-регистров зарядовые пакеты поступают не сразу в элементы горизонтального ПЗС-регистра (выходного), а сначала в накопительные буферные емкости. Перенос в накопительные емкости осуществляется во время прямого хода по строке посредством тактирования импульсами с малой амплитудой (эта процедура названа выметанием заряда). Во время следующего обратного строчного хода заряды из накопительных емкостей через управляющий затвор передаются в выходной регистр и далее выводятся во внешнюю цепь. В ХУ-матрице из-за сужения вертикальных регистров площадь фоточувствительной части до-

стигает 40% площади ячейки, в то время как в обычной СКП-матрице она редко превышает 25%.

ХУ-матрица с инвертирующими усилителями [6, с. 43] теряет черты сходства с СКП-матрицей. Вертикальные ПЗС-регистры заменены вертикальными столбцовыми шинами, аналогичными горизонтальным строчным шинам. Считывание с вертикальной шины большой емкости осуществляется с помощью инвертирующего усилителя на двух МДП-транзисторах, включенного между шиной и выходным ПЗС-регистром. Инвертор усиливает в K раз (K — коэффициент усиления) изменения плавающего потенциала столбцовой шины; эффективная емкость шины и соответственно kTC -шум снижаются при этом в $(1+K)$ раз. Эффективность передачи зарядов из-под шины в выходной регистр резко увеличивается (более 98%) и перестает зависеть от значения считываемого сигнала.

ХУ-матрица с «подкачкой» заряда [6, с. 44] также характеризуется высокой эффективностью считывания со столбцовых шин, однако принцип решения проблемы считывания здесь иной. Между столбцовыми шинами и выходным ПЗС-регистром расположено устройство «подкачки» заряда, которое перед каждым считыванием с шины добавляет (подкачивает) к малому информационному сигналу $Q_{\text{инф}}$ большой постоянный заряд смещения $Q_{\text{см}}$. Увеличение заряда позволяет повышать эффективность переноса в выходной регистр.

Устройство подкачки заряда (рис. 2.17) состоит из двух передающих затворов $ЗП1$ и $ЗП2$ и расположенной между ними плавающей диффузионной области, служащей источником заряда смещения. Плавающая диффузионная область управляется затвором $ЗС$, который расположен над ней и связан с ней емкостной связью. Рассмотрим поэтапно процесс считывания заряда в регистр. В момент t_1 сигнальный заряд хранится в фотодиоде ($\PhiД$ на рисунке). В момент t_2 произошел выбор данной строки, и через открывшийся разрешающий затвор $ЗР$ сигнальный заряд попадает в вертикальную шину. В момент t_3 затвор $ЗР$ уже закрылся, а открывшийся затвор $ЗП1$ приводит к инжекции заряда смещения $Q_{\text{см}}$ в вертикальную шину. В момент t_4 в плавающей диффузионной области образуется потенциальная яма в результате емкостной наводки, созданной скачком потенциала на затворе $ЗС$. В потенциальную яму стекает заряд $Q_{\text{инф}} + Q_{\text{см}}$ с вертикальной шины. В момент t_5 закрывшийся затвор $ЗП1$ изолирует вертикальную шину от потенциальной ямы, в которой хранятся заряды $Q_{\text{инф}}$ и $Q_{\text{см}}$. В момент t_6 снижается глубина потенциальной ямы из-за скачка потенциала на затворе $ЗС$, и через открывшийся затвор $ЗП2$ сигнальный заряд $Q_{\text{инф}}$ стекает в ПЗС-регистр. Заряд смещения $Q_{\text{см}}$ остается при этом в потенциальной яме и будет использован в следующем цикле считывания. В момент t_7 затвор $ЗП2$ закрыт, и устройство возвращается в исходное состояние.

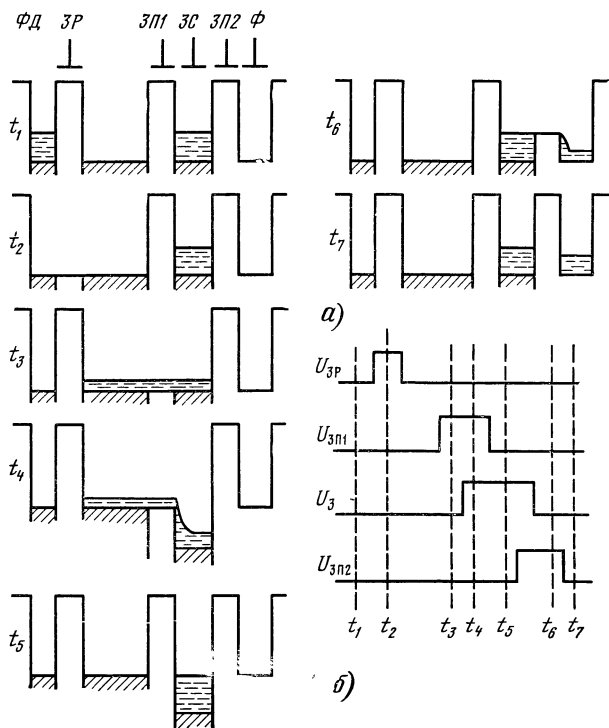


Рис. 2.17. Принцип работы ХУ-матрицы с подкачкой заряда: потенциальная (а) и тактовая (б) диаграммы

Процесс подкачки и считывания повторяют за время обратного хода строчной развертки несколько раз, в результате достигается высокая эффективность (более 98%) переноса информационных зарядов из-под вертикальных шин в выходной ПЗС-регистр.

Наилучшие результаты дает объединение устройства подкачки с инвертирующим усилителем, аналогичным описанному. Вход инвертора (может быть однокаскадным) подключен к вертикальной шине, выход — к передающему затвору ЗП1. В результате того, что на затвор подаются усиленные изменения потенциала шины, эффективность переноса информационного заряда в диффузионную область заметно возрастает. Высокая эффективность переноса позволяет отказаться от многократной подкачки.

В ХУ-матрицах с вертикальными шинами информационный заряд не движется направленно, как в вертикальных регистрах, и это позволяет снабдить матрицы двумя выходными регистрами. Один из них располагается снизу, а другой — сверху от фоточувствительной области. Четные вертикальные шины считываются одним выходным регистром, нечетные — другим. Использование двух выходных регистров не является специфической особен-

ностью ХУ-матриц: в КП- и СКП-матрицах применяют два и более выходных регистра, что позволяет снизить частоту тактирования и, следовательно, улучшить эффективность переноса зарядов, а также увеличить число элементов в строке из-за уменьшения их шага. Однако в КП- и СКП-матрицах выходные регистры располагаются с одной стороны фоточувствительной области — именно в силу направленности вертикального переноса. При этом возникают трудности с распределением считываемых зарядов по регистрам, приходится вводить дополнительные затворы и усложнять тактовую диаграмму. Возможность разнесения выходных регистров в ХУ-матрицах с вертикальными шинами облегчает конструирование регистров и позволяет выделять больше места для размещения устройств стыковки шин с регистрами.

Гибридные ФПЗС характеризуются высокой степенью интеграции и надежностью; ближе всего они к МОП-интегральным микросхемам, но отличаются менее сложной топологией и принципиально не достигают того массового уровня производства, на котором находятся, скажем, МОП ЗУ. Можно утверждать, что от ФПЗС требуется в первую очередь не количество, а качество. Вряд ли когда-либо они будут выпускаться миллионными партиями, но тенденция к улучшению параметров и расширению диапазона регистрируемого излучения останется неизменной. В то же время возможности технологии интегральных приборов ограничены, и не всегда она может обеспечить решение возникающих проблем: например, создать матрицу ФПЗС с числом элементов 5000×5000 , линейку с 10000 элементами, кремниевый ИК ФПЗС, работающий при тех же температурах, что и ФПЗС на узкозонных полупроводниках. Задачи подобного рода решает гибридная технология. Гибридные ФПЗС логично разбить на три типа в зависимости от класса решаемой задачи:

ФПЗС на основе полупроводника одного вида, в которых гибридная структура используется только для наращивания числа фотоячеек;

ФПЗС на основе гибридного объединения двух разных полупроводников и улучшения в результате этого в первую очередь фотоэлектрических характеристик (задача увеличения числа фотоячеек решается параллельно).

ФПЗС любого типа, соединяемые с устройствами, расширяющими диапазон применения. Таким устройством может быть ЭОП, образующий с ФПЗС высокочувствительный *бимодульный* прибор или интегрированный в одном корпусе с ФПЗС микрохолодильник.

Наращивание числа фотоячеек достигается соединением на кроссировочной плате кристаллов ФПЗС «встык» либо с перекрытием. Для соединения встык (рис. 2.18,а) необходимо тщательно обрабатывать вертикальные грани кристаллов с помощью травления и механической шлифовки — полировки. Современный уровень обработки позволяет сократить ширину *слепой зоны* в местах стыковки до размеров двух фотоячеек. Гибридная сборка встык сложна, но дает возможность объединять практически лю-

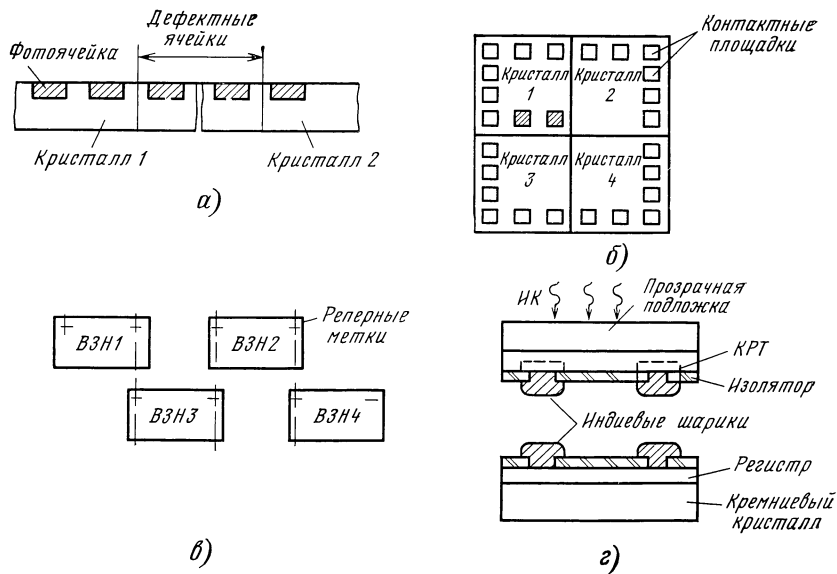


Рис. 2.18. Виды гибридных ФПЗС:

а — разрез сборки встык; *б* — сборка встык матрицы; *в* — сборка с перекрытием, *г* — сборка разнородных кристаллов посредством индиевых шариков

бые типы ФПЗС (линейные, ВЗН, матричные). При сборке встык матричных кристаллов возникают ограничения (рис. 2.18,б): если контактные площадки расположены по двум сторонам кристалла, можно собрать не более четырех кристаллов (два кристалла по каждой оси). Расположение контактных площадок по одной стороне кристалла несколько расширяет возможности, так как по одной оси можно собрать в принципе любое число кристаллов, по другой оси соединяется также не более двух кристаллов.

В собираемых кристаллах между краем кристалла и ближайшей фотоячейкой располагают узкую стоковую область для устранения эффекта паразитной инжекции носителей с нарушенных при обработке граней кристалла.

Сборка с перекрытием устраняет пространственные слепые зоны, но применима только к линейкам и ВЗН. Для точной сборки предусматривают на кристаллах реперные метки (например, в виде крестов), как показано на рис. 2.13,в. При сборке с перекрытием приходится учитывать сдвиг во времени фрагментов ТВ-изображения, формируемых соседними кристаллами. Если не запоминать полную информацию с каждого кристалла, а снимать ее в реальном масштабе времени, возникнут «временные» слепые зоны из-за того, что во время перехода изображения объекта с одного кристалла на другой изображение объекта не фиксируется. Объединение кристаллов полупроводников разного рода используется только для создания ФПЗС ИК-диапазона. Возмож-

ны два варианта соединения кристаллов: *объемный*, осуществляемый с помощью индиевых шариков, и *планарный*, в котором используют те или иные методы металлизации «через край» кристалла (проволочный монтаж, балочные выводы, полиимидные гибкие шлейфы и др.). На рис. 2.18,г показана структура гибридного ИК ФПЗС. На прозрачной для ИК-излучения подложке расположен кристалл антимонида индия или КРТ с фотоячейками. Каждая фотоячейка индиевым шариком соединена с элементами ввода электрического сигнала регистров считывания, сформированных на кремниевом кристалле. Требования к подложке в гибридных ИК ФПЗС особенно жестки, так как она должна обеспечивать минимальные отклонения от фокальной плоскости в диапазоне температур от комнатной до криогенных. В [13] для подложки использован поликремний, легко обрабатываемый, имеющий высокую теплопроводность при криогенных температурах и достаточно прочный механически.

2.3. Характеристики и параметры

Характеристики ФПЗС можно разбить на три группы: *фотоэлектрические*, определяющие эффективность преобразования оптического изображения в электрические сигналы; *конструктивные*, представляющие качественные (тип канала переноса, способ считывания и др.) и количественные (размеры фотоячейки, фоточувствительной области и т. д.) сведения о ФПЗС; *эксплуатационные*, содержащие сведения о тактовых диаграммах, рабочих частотах, воздействии внешних факторов (температуры, механических, радиационных и др.), дополнительные указания, например способы пайки при монтаже в аппаратуре.

Основная группа характеристик — фотоэлектрических для ФПЗС видимого диапазона — достаточно полно описывается *свет-сигнальной и частотно-контрастной характеристиками*.

Свет-сигнальная характеристика, связывающая выходной сигнал с освещенностью в плоскости ФПЗС, показана на рис. 2.19. Привлекает внимание ее линейность в широких пределах изменения освещенности. Лучшие ФПЗС имеют динамический диапазон $5 \cdot 10^3$. Выделяют три точки на свет-сигнальной характеристике, в которых измеряют параметры ФПЗС. В средней части удобно определять *интегральную вольтовую чувствительность* как отношение изменения светового сигнала к изменению освещенности (В/лк), энергетической освещенности ($\text{В/Вт} \times \text{см}^{-2}$), световой экспозиции ($\text{В/лк} \cdot \text{с}$) или энергетической экспозиции ($\text{В/Дж} \cdot \text{м}^{-2}$) в заданном спектральном диапазоне. Поскольку свет-сигнальная

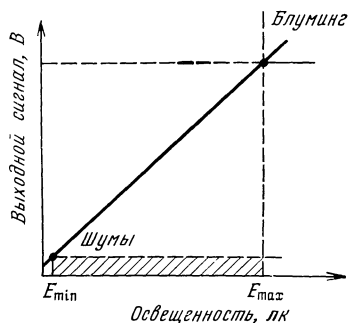


Рис. 2.19. Свет-сигнальная характеристика ФПЗС

характеристика линейна, можно измерять просто отношение светового сигнала к освещенности или экспозиции. Обычно S_U выражают в В/лк (если ФПЗС работает в стандартном ТВ-режиме) или в В/лк·с. Значения интегральной чувствительности составляют $10^{-2} \dots 10^{-3}$ В/лк·с и определяются следующими конструктивно-технологическими факторами: эффективностью ввода оптической информации и преобразования ее в зарядовую форму; отношением емкости узла считывания к емкости ячейки накопителя; конструкцией выходного устройства.

В разных участках ФПЗС выходной сигнал может изменяться, так как колеблются толщина электродов МОП-накопителя, концентрация примеси в фотодиодных ячейках, размеры светочувствительных элементов. Для оценки воспроизводимости вводят параметр *неравномерность выходного сигнала* ΔU_c (абсолютную или относительную), т. е. геометрическую неоднородность, поэтому измерения проводят в нескольких точках.

Нижняя часть свет-сигнальной характеристики дает представление о работе ФПЗС в пороговой области, т. е. при предельно низких значениях освещенности (облученности или экспозиции). Если полностью затемнить ФПЗС, на выходе останется некоторый темновой сигнал, характеризуемый параметрами: *напряжение темнового сигнала* U_T и *неравномерность напряжения темнового сигнала* ΔU_T (абсолютная или относительная). Темновой сигнал образуется шумами ФПЗС — детерминированными и флуктуационными (см. гл. 1). Детерминированные шумы, в свою очередь, состоят из помех от тактового питания (как правило, от импульсов, подаваемых на затвор транзистора сброса) и геометрических темновых шумов. Геометрические темновые шумы представляют неоднородность распределения темнового тока. В гл. 1 рассмотрен процесс тепловой генерации, вызывающей темновой ток и связанной с поверхностными и объемными генерационно-рекомбинационными центрами. Причины появления таких центров различны, но в основном они сводятся к осаждению (*преципитации*) металлов в местах нарушения кристаллической решетки. Картина темнового сигнала, снятая с выхода ФПЗС, показывает, что темновой сигнал неравномерен, причем локальные всплески в подавляющем большинстве (80%) совпадают с расположением преципитатов металлов. Темновые параметры характеризуют технологический уровень изготовления ФПЗС и температуру, при которой находится прибор. При переходе от темнового режима к низким уровням освещенности геометрическая неоднородность сигнала чаще всего возрастает, так как под действием света включаются новые центры генерации — рекомбинации и начинают активнее проявляться имевшиеся. К геометрической неоднородности следует отнести и *локальную люминесценцию*, наиболее сильно проявляющуюся при низких уровнях освещенности. Возможны четыре типа локальной люминесценции: вызванная тактированием выходного регистра; связанная с предпробойным состоянием *p-n*-переходов в устройстве входа-выхода; возникающая при проколе МОП-

транзисторов в выходных устройствах; светящиеся пятна. Первый тип люминесценции наблюдается в матричных ФПЗС в режимах малой освещенности и большого времени накопления. Выходной регистр во время периода накопления работает, и тактирование его фазовых электронов может вызвать появление длинноволновых фотонов, поглощаемых в ближайших к выходному регистру элементах вертикальных сдвиговых регистров. Свечение быстро спадает по мере удаления от выходного регистра (10—20 элементов) и зависит от смещения на фазах, частоты и фронтов тактовых импульсов выходного регистра, а также от температуры. Генерация фотонов *p-n*-переходом в состоянии, близком к пробое, давно известна. Наблюдение ее в ФПЗС показало, что излучение происходит в ближнем ИК-диапазоне, к которому кремниевые ФПЗС достаточно чувствительны. На ТВ-изображении, снимаемом с защищенного от света ФПЗС, можно наблюдать светящуюся область, распространяющуюся от выходного устройства, на которое подали слишком высокое напряжение. Аналогичная ситуация возникает при проколе канала выходного МОП-транзистора. Когда напряжение на стоке становится намного выше напряжения на затворе, создаются условия для лавинного процесса генерации пар электрон — дырка и эмиссии фотонов в ближней ИК-области. Наиболее серьезной проблемой является подавление светящихся пятен. Причиной их возникновения служат локальные утечки между фазами и между фазой и подложкой. Поскольку площадь матричных ФПЗС велика, вероятность появления пятен значительна. Отличить светящиеся пятна от белых точек на изображении, вызываемых избыточным темновым током, можно, охлаждая ФПЗС. Методом борьбы со светящимися пятнами является снижение фазовых напряжений, а также регулировка (уменьшение) смещения подложки в период накопления.

Флуктуационные шумы ФПЗС представлены двумя основными составляющими — шумом переноса и шумом выходного устройства. Шум переноса вызывается неэффективностью переноса и прямо пропорционален ей. При высокой эффективности современных ФПЗС со скрытым каналом этот шум не играет существенной роли. Основной проблемой остается шум выходного устройства. Он пропорционален корню квадратному из емкости узла считывания и принципиально неустраним. Путь к его снижению лежит в оптимальном конструировании выходных устройств. Флуктуационные шумы характеризуют *напряжением временной компоненты шума* $U_{ш.вр}$, которое есть среднеквадратическое значение временной флуктуации сигнала на фиксированном сопротивлении нагрузки в заданной полосе частот и в отсутствие излучения. Измерение напряжения временной компоненты шум позволяет ввести отношение сигнал-шум и определить параметры, характеризующие пороговый режим работы ФПЗС: *пороговую энергетическую освещенность* E_p , *пороговый поток* Φ_p и *пороговую экспозицию* H_p . Значение пороговой энергетической освещенности фоточувствительной поверхности соответствует напряжению

сигнала, равному напряжению временной компоненты шума. Аналогично определяется и пороговый поток. Пороговая экспозиция представляет произведение пороговой освещенности на время накопления. Шумы и пороговые параметры измеряют на одном элементе ФПЗС, делая серию выборок во времени (чем больше, тем точнее будет определен измеряемый параметр).

Верхняя часть свет-сигнальной характеристики отражает два параметра: *максимальный выходной сигнал*, характеризующий напряжением насыщения выходного сигнала $U_{\text{нас}}$ и соответствующий заполнению потенциальных ям, и *реакцию ФПЗС на локальные пересветки*, т. е. переполнение потенциальных ям в участках повышенной освещенности. Равномерная пересветка ФПЗС, вызывающая переполнение всех потенциальных ям в фоточувствительной области, не столь страшна. Ее подавляют с помощью нейтральных оптических фильтров или изменением времени накопления. Локальные пересветки подавить намного труднее, и борьба с ними в настоящее время становится одной из важнейших проблем. При локальных пересветках на ТВ-изображении наблюдаются расплывающиеся пятна и полосы, вытянутые по направлению переноса зарядовых пакетов. Явление расплывания получило название *блуминга*. Оценку блуминга проводят различными способами, например; измеряя ширину расплывшегося изображения и относя ее к ширине проецируемой полосы или определяя отношение избыточной локальной освещенности к освещенности, вызывающей наполнение потенциальной ямы.

Для устранения блуминга необходимо тем или иным способом предотвратить распространение избыточных носителей от участка локальной пересветки. Возможны два пути: схемотехнический и конструктивный.

Схемотехнический способ осуществления антиблуминга сводится к интенсивной рекомбинации избыточных носителей на поверхностных состояниях. Способ применяется в матричных ФПЗС с кадровым переносом, при этом конструкция ФПЗС остается неизменной (или подвергается небольшим изменениям), достаточно лишь изменить тактовые последовательности управляющих импульсов. Часть электродов в ячейках секции накопления переключается во время обратного хода по строке с обедняющего смещения на инвертирующее. Основные носители из близлежащих стоп-канальных областей выходят на поверхность под этими электродами. При последующем переключении на обедняющее смещение избыточные носители заполняют поверхностные ловушки, рекомбинируя на них. Переключение происходит несколько раз за время обратного хода по строке. В каждом элементе, где заряд превышает величину максимально хранимого, поверхностные состояния поочередно заполняются то электронами, то дырками. Это приводит к повышенной рекомбинации избыточного заряда на поверхностных ловушках. В качестве примера приведем матричный ФПЗС с кадровым переносом, со скрытым каналом n -типа и плотностью поверхностных состояний примерно 10^{10} см^{-2}

[23]. При пятикратном переключении можно заставить прорекомбинировать $1,5 \cdot 10^{13}$ электрон·см⁻² (при данном темпе рекомбинации за суммарное время). Плотность максимального заряда в данной матрице соответствует $5 \cdot 10^{11}$ электрон·см⁻², т. е. допустимы 30-кратные пересветки. При больших пересветках начнется расплывание, но оно будет ограниченным, так как в соседних ячейках по мере переполнения также начнется ускоренная рекомбинация.

Конструктивное решение состоит во введении в структуру ФПЗС антиблуминговых стоков, по которым избыточные носители выносятся на периферию. Этот способ гораздо эффективнее рекомбинационного, однако он требует усложнения конструкции и технологии ФПЗС и в случае, когда антиблуминговые стоки расположены на поверхности ФПЗС (горизонтальные стоки), приводит к потере полезной площади.

Простейшим способом антиблуминг осуществляется в линейных ФПЗС с одним регистром считывания (см. рис. 2.11). Большинство современных линейных ФПЗС выполняются двухрегистровыми. Поэтому в линейных ФПЗС встраивают не горизонтальные, а вертикальные антиблуминговые устройства. В матричных ФПЗС горизонтальные стоки применены по-прежнему, здесь они конкурируют с вертикальными.

Вертикальный сток был впервые введен в линейный ФПЗС в виде скрытого *p-n*-перехода [14], расположенного на глубине около 10 мкм от поверхности. Антиблуминг такой конструкции обеспечил степень пересветки 230 : 1. Дальнейшее развитие идеи вертикальных стоков привело к двум решениям: использованию *p*-карманов (ПК) и эпитаксиальных структур с *p-n*-переходами пленка — подложка. На рис. 2.20,а приведено поперечное сечение ячейки матрицы с *p*-карманами [6]. Отдельный передающий электрод отсутствует, его роль выполняет та часть электрода движкового регистра, которая, выступая за край скрытого канала, накрывает передающую область. Пороговое напряжение в этой об-

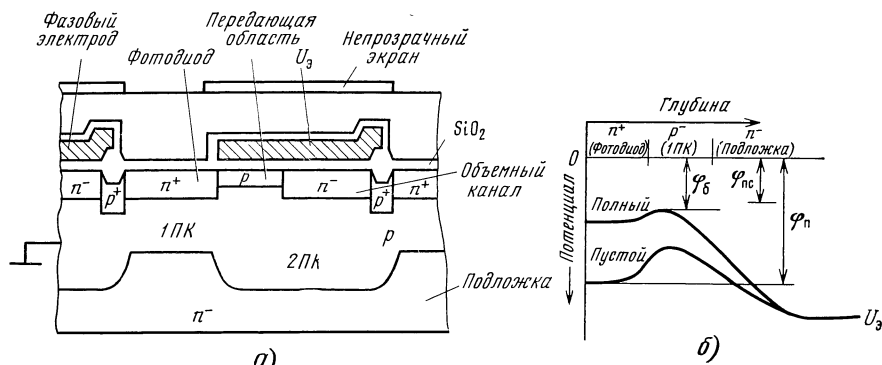


Рис. 2.20. Устройство вертикального антиблуминга:

а — ячейка фотодиодной матрицы с двумя *p*-карманами; б — распределение потенциала

ласти задается путем проведения дополнительного процесса ионной имплантации. Фотодиод находится в слаболегированном p -кармане $1PK$, остальная часть ячейки — в более сильнолегированном и глубоком p -кармане $2PK$. Концентрация примеси в кармане $1PK$ выбрана такой, что он полностью обедняется при приложении небольшого обратного смещения к n -подложке относительно заземленного p -кармана. Карман $2PK$ легирован таким образом, чтобы обеспечить эффективную работу ПЗС-регистра со скрытым каналом. В обычном режиме работы карман $2PK$ не обеднен. Элемент четырехфазного ПЗС-регистра состоит из четырех фазовых электродов. Электроды $\Phi 1$ и $\Phi 2$, выполняющие одновременно роль передающих, контролируют передачу заряда из фотодиода в регистр. Они управляются трехуровневым напряжением — высоким, средним и низким, с уровнями $U_{в.у.}$, $U_{с.у.}$, $U_{н.у.}$. Электроды фаз регистра $\Phi 3$ и $\Phi 4$ управляются напряжением с двумя уровнями $U_{в.у.}$ и $U_{н.у.}$. Уровень $U_{в.у.}$ устанавливается таким, чтобы слить накопленный заряд из фотодиода через передающую область затвора. Разница между $U_{с.у.}$ и $U_{н.у.}$ выбирается так, чтобы обеспечить нормальную работу вертикального регистра и достаточную зарядовую емкость, сохраняя закрытой передающую область.

На рис. 2.20,б показаны также профили потенциала под фотодиодом в отсутствие переполнения для двух предельных значений уровня сигнала. На рисунке n -подложка обратно смещена на $U_{п}$ относительно заземленного кармана $2PK$, карман $1PK$ при этом полностью обеднен.

Когда фотогенерированный сигнальный заряд считывается в вертикальный регистр, в n -области фотодиода устанавливается потенциал $\phi_{пс}$, равный потенциалу в канале под передающим электродом при уровне напряжения на нем $U_{в.у.}$. В этот момент профиль потенциала изображается нижней кривой («пустой»). Затем по мере накопления сигнального заряда потенциал фотодиода уменьшается. При достаточно сильном освещении распределение потенциала станет соответствовать кривой, обозначенной «полный». По достижении этого момента профиль потенциала перестанет меняться, так как все избыточные носители будут теперь сливаться через барьер ϕ_6 в подложку. Значение $\phi_{п}$ выбирают таким, что ϕ_6 (соответствующий минимальному потенциалу в $1PK$ на кривой, обозначенной «полный») больше, чем потенциал в канале под передающим затвором при уровне напряжения $U_{в.у.}$ на передающем электроде. Тогда весь избыточный заряд будет стекать в подложку до того, как он начнет переливаться в вертикальный регистр. Это означает, что блуминг полностью подавляется.

Проведенные в [15] расчеты показали, что значение напряжения $U_{п}$, необходимое для подавления блуминга, чрезвычайно чувствительно к концентрации примеси в кармане $1PK$.

Эпитаксиальный антиблуминг отличается от антиблуминга с p -карманом только технологически. Использование эпитаксиальных структур удобно тем, что толщина эпитаксиального слоя и

концентрация примеси точно контролируются. Однако эпитаксиальные структуры стоят довольно дорого и не всегда характеризуются высоким качеством. Этим, скорее всего, и объясняется предпочтение, отдаваемое способу создания p -кармана. Вертикальные стоки не только подавляют блуминг, но и уменьшают влияние носителей генерируемых в объеме длинноволновыми фотонами, снижают темновые токи.

На блуминг внешне похож смаз изображения, оно расплывается вниз по вертикали, как если бы потенциальные ямы слегка переполнялись. Происхождение смаза, однако, иное, нежели блуминга. В матричных ФПЗС с кадровым переносом смаз возникает из-за паразитной засветки при переносе зарядовых пакетов из фоточувствительной секции в секцию памяти. Хотя время накопления при переносе мало, при больших освещенностях возможно добавление носителей последующего кадра к носителям предыдущего и в результате смаз изображения. Для подавления этого эффекта повышают частоту переноса. При частоте переноса 4 МГц, достигнутой в лучших матрицах, явление смаза подавляется. В матричных ФПЗС со строчно-кадровым переносом смаз вызывается попаданием в защищенные от света вертикальные сдвиговые регистры носителей, генерируемых в объеме длинноволновыми фотонами. В отличие от матриц с кадровым переносом в этих матрицах смаз проявляется при малых освещенностях. Методы подавления смаза в матрицах со строчно-кадровым переносом аналогичны применяемым для борьбы с блумингом — использование вертикальных стоков и эпитаксиальных структур.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) ФПЗС, определяющая разрешающую способность прибора, приведена на рис. 2.21. Она описывает ответ ФПЗС на оптический сигнал в форме меандра с определенной пространственной частотой. Для того чтобы снять ЧКХ, на ФПЗС проецируют штриховую миру, шаг которой задает пространственную частоту работы ФПЗС. При этом удобно пользоваться отношением данной пространственной частоты f к максимальной f_{\max} , т. е. той, при которой шаг миры равен шагу светочувствительных элементов ФПЗС. В идеальном ФПЗС при проекции штриховой миры на выходе должны появляться сигналы прямоугольной формы; реально форма сигналов сглаживается, и на высоких пространственных частотах выходной сигнал напоминает синусоиду. Отношение размаха выходного сигнала при передаче штриховой миры заданной пространственной частоты или электрически введенного сигнала заданной частоты к размаху сигнала от крупной детали изображения или электрически введенного сигнала (заполняющего не менее пяти потенциальных ям) определяет *коэффициент передачи модуляции* K_m . Практически для того чтобы характеризовать ФПЗС, достаточно измерить коэффициент передачи модуляции на какой-либо фиксированной частоте, чаще всего на половине максимальной пространственной частоты. Последнее связано с тем, что, согласно *теореме Найквиста*, приемник передает без искажений простран-

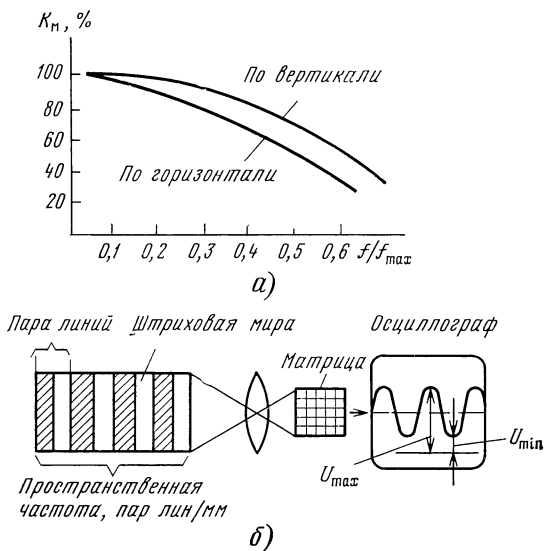


Рис. 2.21. Частотно-контрастная характеристика ФПЗС (а) и способ измерения коэффициента модуляции (б)

венные частоты, не превышающие половины максимальной. При проецировании более высоких пространственных частот проявляется эффект Муара в виде ложных изображений.

Вид ЧКХ любого ФПЗС определяется тремя факторами: геометрией активной части прибора, т. е. размерами и шагом фоточувствительных элементов (ЧКХ-интегрирования, выражаемая коэффициентом передачи модуляции $K_{м1}$); эффективностью переноса носителей (ЧКХ-переноса, выражаемая коэффициентом передачи модуляции $K_{м2}$); диффузией носителей, генерируемых длинноволновыми фотонами (ЧКХ-диффузии, выражаемая коэффициентом передачи модуляции $K_{м3}$).

Для прямоугольных фоточувствительных элементов размером l , расположенных с шагом p , зависимость $K_{м1}$ от пространственной частоты f описывается выражением

$$K_{м1} = \frac{\sin \left(f/f_{\max} \frac{\pi l}{2 p} \right)}{f/f_{\max} \frac{\pi l}{2 p}},$$

где $f_{\max} = 1/2p$. Если элементы расположены вплотную ($l=p$), то $K_{м1}=0$ при $f=2f_{\max}$; на пространственной частоте, равной максимальной, $K_{м1}=64\%$. Такая ЧКХ свойственна, например, ФПЗС с кадровым переносом. Следует помнить, что ЧКХ будет различной по вертикали и горизонтали. Если же шаг элементов отличается от их размера (как в матрицах со строчно-кадровым переносом, где по горизонтали светочувствительные столбцы чередуются со сдвиговыми регистрами), вид ЧКХ изменится. Здесь коэф-

коэффициент передачи модуляции на максимальной частоте составит примерно 85%. Надо сказать, что выражение для $K_{м1}$ не отражает фазовой составляющей ЧКХ и относится к наилучшему случаю, когда полосы мира и элементы ФПЗС совпадают по фазе. В реальных условиях следует учитывать фазовую компоненту ЧКХ, уменьшающую разрешающую способность.

Спад ЧКХ в зависимости от числа переносов n и неэффективности одного переноса ε определяется выражением $K_{м2} = \exp\{-n\varepsilon[1 - \cos(nf/f_{\max})]\}$. При измерениях коэффициента передачи модуляции на половине максимальной пространственной частоты это выражение упрощается: $K_{м2} = \exp(-n\varepsilon)$.

Чтобы оценить роль неэффективности переноса, примем, что в матричном ФПЗС с поверхностным каналом неэффективность одного переноса равна $2 \dots 5 \cdot 10^{-4}$, число элементов составляет 500×500 . Тогда общая потеря переноса $n\varepsilon = 0,2 \dots 0,5$ и соответствующие значения коэффициента передачи модуляции на половине максимальной пространственной частоты не превысят 50 ... 70%. Горизонтальная ЧКХ переноса определяется числом переносов в горизонтальном выходном регистре, вертикальная ЧКХ будет хуже горизонтальной, так как к переносам в выходном регистре добавляются переносы в вертикальных столбцах. Из этого примера становится ясным, почему ФПЗС, отвечающие высоким требованиям к разрешающей способности, должны выполняться со скрытым каналом.

В современных ФПЗС с большим числом элементов и высокой эффективностью переноса диффузия носителей, генерируемых длинноволновыми фотонами, становится серьезным фактором, ограничивающим разрешающую способность. Длинноволновые фотоны (0,66 ... 1,1 мкм) проникают глубоко в объем полупроводника, так как слабо поглощаются кремнием. Генерированные носители диффундируют во всех направлениях. Большая часть их попадает в соответствующую фотоячейку, но значительное количество и в соседние фотоячейки. Возникают перекрестные помехи, разрешающая способность падает. Спад ЧКХ-диффузии тем больше и коэффициент модуляции $K_{м3}$ тем ниже, чем ближе расположены фотоячейки, чем больше глубина проникновения фотонов и чем выше диффузионная длина носителей. Введение в конструкцию ФПЗС обратносмещенного p - n -перехода (p -карман, эпитаксиальная структура) позволяет значительно уменьшить спад ЧКХ-диффузии, так как поле p - n -перехода вытягивает в подложку генерированные в глубине носители.

Помимо свет-сигнальной характеристики и ЧКХ в основную группу включают спектральную характеристику, точнее, *область спектральной чувствительности* (речь идет о видимом диапазоне), определяемую как диапазон длин волн, в котором относительная спектральная чувствительность составляет не менее 0,1 своего максимального значения. У ФПЗС с поликремниевыми электродами МОП накопительных фотоячеек максимум спектральной чувствительности лежит вблизи 800 ... 900 нм.

К фотоэлектрическим параметрам относятся также дефекты, наблюдаемые на ТВ-изображении или осциллографической картине. Наблюдаемые дефекты образуются в результате того, что сигнал с одной или нескольких примыкающих фотоячеек отличается от среднего значения выходного сигнала (подсчитываемого по всему фоточувствительному полю или его части). Обычно задают предельно допустимую величину отличия и тем самым фиксируют дефектную фотоячейку или группу ячеек. Основные типы дефектов — это светлые и темные столбы, светлые и темные пятна, размеры которых зависят от числа фотоячеек, образующих дефект (например, светлый столб длиной не более десяти фотоячеек). Число дефектов определяют на всем поле или на его части (см. гл. 3).

Качественные конструктивные характеристики ФПЗС рассмотрены в § 2.2. К количественным конструктивным характеристикам относятся: *число элементов* N для линейек; $N_{\text{ст}}$, $N_{\text{стр}}$ для матриц, где $N_{\text{ст}}$, $N_{\text{стр}}$ относятся к столбцу и строке соответственно; *размер фотоячейки* $a \times b$ и *фоточувствительной области* $H \times L$. Для матриц, работающих в телевизионном стандарте, соотношение сторон фоточувствительной области нормировано (например, 5:4). Помимо перечисленных параметров, необходимо указывать толщину и материал оптического окна и расстояние от окна до поверхности кристалла ФПЗС.

К эксплуатационным характеристикам относят в первую очередь сведения об управлении ФПЗС: тактовую диаграмму, частоту вывода сигнала, уровни импульсных и постоянных смещений, сопротивление нагрузке. В справочных данных дополнительно приводятся емкости фазовых электродов ФПЗС, без знания которых трудно рассчитать схему управления.

Верхняя граница рабочих частот ФПЗС определяется каналом переноса и выходным устройством. У ФПЗС со скрытым каналом рабочие частоты достигают 20... 40 МГц (до 140 МГц у перистальтического канала); ФПЗС с поверхностным каналом ограничены частотами 3... 7 МГц. Во многих случаях рабочую частоту начинают ограничивать МОП-транзисторы выходного устройства. Преодолеть это можно переходом от однокаскадного истокового выходного повторителя к двух-трехкаскадному, позволяющему оптимально согласовать емкость нагрузки с емкостью узла считывания. *Нижняя частота* ФПЗС лежит вблизи 1 кГц и определяется процессом генерации — рекомбинации носителей при рабочей температуре: при увеличении времени нахождения зарядового пакета в потенциальной яме растет доля паразитного темнового заряда, и полезная информация теряется.

В отношении механических и климатических воздействий ФПЗС мало отличаются от других типов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Исключение могут составлять гибридные ФПЗС. Воздействие же температуры и радиации на ФПЗС выражено гораздо сильнее, поскольку приходится оперировать с исключительно малыми количествами зарядов, не встречающимися

в любых других приборах. Для компенсации влияния повышенных температур (обычно значение предельной рабочей температуры для кремниевых ФПЗС видимого диапазона не превышает 60°C) применяют охлаждение с помощью термоэлектрических микрохолодильников.

Влияние радиации можно разделить на четыре вида эффектов.

Увеличение положительного заряда в диэлектрике, вызываемое ионизацией с последующим разделением электронно-дырочных пар полем. Электроны уходят из диэлектрика, дырки остаются на глубоких ловушках. Положительный заряд в диэлектрике вызывает изменение порогового напряжения, которое зависит от следующих факторов:

материала электрода, для поликремниевых электродов оно гораздо больше, чем для алюминиевых;

толщины и технологии формирования диэлектрика. Например, тонкий оксид, выращенный в сухом кислороде, оказывается более стойким, нежели оксид с большей толщиной, выращенный во влажной атмосфере;

величины и полярности управляющих смещений. Положительные смещения на электроде дают более резкие изменения, нежели отрицательные;

типа и полярности канала (более радиационно стойкими оказываются ФПЗС с объемным, а не поверхностным каналом, причем объемным каналом *n*-типа, относительно которого электроды смещены отрицательно). Увеличение положительного заряда в диэлектрике, главным образом, влияет на глубину потенциальных ям. Этот эффект можно частично скомпенсировать изменением смещений на электродах.

Увеличение плотности поверхностных состояний по физическому механизму возникновения аналогичен увеличению заряда в диэлектрике, но отличается по влиянию на параметры ФПЗС: из-за увеличения плотности поверхностных состояний падает эффективность переноса и растут шумы. Изготовленные по стандартной технологии ПЗС выдерживают радиацию с дозами не более $10^3 \dots 10^4$ рад [16, 17]. Для увеличения радиационной стойкости применяется специальная технология.

Нестационарные ионизационные эффекты менее опасны, чем рассмотренные, но при импульсных радиационных воздействиях могут приводить к стиранию информации. В типичном ФПЗС для заполнения потенциальной ямы носителями, генерированными в полупроводнике в результате ионизации, достаточно дозы менее 1 рад [16], причем ФПЗС с объемным каналом проигрывают ФПЗС с поверхностным каналом, обладающим большей зарядовой емкостью. Ионизацию вызывают главным образом гамма-излучение и облучение электронами. Мягкое гамма-излучение проникает неглубоко, и связанные с ним эффекты ограничиваются диэлектриком и границей раздела диэлектрик — полупроводник. Воздействие электронов аналогично воздействию гамма-излучения, но электроны, в отличие от гамма-частиц, сильно тормозятся де-

талями корпуса и пассивными областями прибора (электродами, защитными покрытиями и др.).

Объемные радиационные нарушения при облучении быстрыми нейтронами или протонами приводят к ухудшению эффективности переноса в ФПЗС с объемным каналом и увеличению темнового тока в ФПЗС с поверхностным и объемным каналами. Эффективность переноса линейно ухудшается с увеличением интегральной дозы нейтронов в диапазоне $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (средняя энергия нейтронов 15 МэВ). Доза 10^{13} см^{-2} является предельной, так как эффективность снижается (до 0,992 [16]). С поверхностным каналом ФПЗС более стойки к нейтронному облучению, нежели ФПЗС с объемным. Для повышения стойкости ФПЗС с объемным каналом предложено повышать степень легирования подложки и использовать кремний с повышенной концентрацией кислорода [16, с. 222].

Измерения характеристик и параметров ФПЗС производится аналоговым либо аналого-цифровым способами. В последнем случае появляется возможность использования ЭВМ для управления ФПЗС и обработки выходного сигнала. Различают два варианта аналого-цифровых измерительных систем: для локальных измерений, когда обрабатывают сигнал с одной или немногих фотоячеек, и для измерений по всему полю, позволяющих получить представление о геометрической неоднородности параметров. Локальная система не требует большого объема памяти, работает на малой частоте и позволяет применять высокоточный, до 13 разрядов аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Полнопольная система нуждается в большом объеме памяти, минимум на два кадра, чтобы вычитать темновой сигнал. Кроме того, при работе на большой частоте в реальном масштабе времени приходится идти на снижение разрядности АЦП. При любом способе измерений, помимо электронных блоков, необходимой частью измерительной системы является фотометрированный оптический блок (проектор, осветитель и т. д.), с помощью которого задается освещенность в фокальной плоскости, совпадающей с поверхностью ФПЗС.

На рис. 2.22,а показана функциональная схема аналоговой измерительной системы. Оптический блок включает диапроектор типа АЛ-39 или АЛ-40 и набор фильтров: нейтральных для дискретного изменения освещенности (плавное изменение обеспечивает диафрагма объектива проектора) и светофильтров, вырезающих при необходимости часть спектрального диапазона. Например, для оценки влияния длинноволновых фотонов на ЧКХ прибора применяют фильтр, поглощающий ближнее ИК-излучение. Оптический блок включает также набор штриховых миш и диапозитивов ТВ-таблиц, используемых для измерений разрешающей способности и ЧКХ. В электронную часть системы входят блок управления, формирующий тактовую диаграмму ФПЗС, блок обработки выходного сигнала, ТВ-монитор и осциллограф. Блок управления содержит синхрогенератор-формирователь импульсных напряжений и преобразователь уровня. Отметим, что при работе на высоких частотах

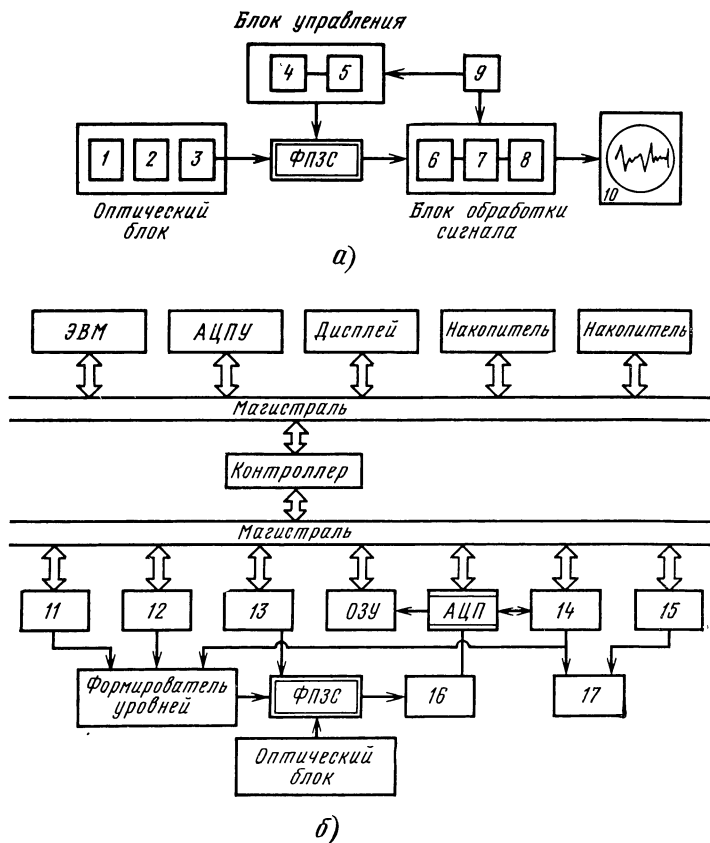


Рис. 2.22. Измерительные системы:

а — аналоговая; б — аналого-цифровая; 1 — проектор; 2 — оптические фильтры; 3 — штриховые миры; 4 — синхрогенератор; 5 — преобразователь уровней; 6 — усилитель; 7 — НЧ-фильтр; 8 — двойная коррелированная выборка; 9 — блок выборки элемента; 10 — осциллограф; 11 — блоки задания импульсных смещений; 12 — блок управления (формирование тактовой диаграммы); 13 — блок постоянных смещений; 14 — блок синхронизации; 15 — привод ТВ-монитора; 16 — согласующий усилитель; 17 — ТВ-монитор

тах (более 10 МГц) схмотехническое решение преобразователя уровня играет решающую роль, так как емкости фаз ФПЗС велики и их перезарядка требует применения сильноточных ВЧ-ключей. Качество выполнения блока обработки выходного сигнала является важнейшим моментом создания любой измерительной системы. Объясняется это тем, что самыми трудными для измерений параметрами являются шумовые параметры ФПЗС. Все ФПЗС обладают рекордно малыми выходными емкостями, и собственные шумы ФПЗС находятся на уровне десятков и сотен электронов. Измерить столь малое шумовое напряжение — сложная задача, особенно на высокой частоте. Шумящий вход измерительного тракта не позволит корректно оценить шумы ФПЗС, так как система будет измерять свои шумы. Блок обработки выходного сиг-

нала в простейшем варианте представляет широкополосный усилитель с большим динамическим диапазоном. К усилителю могут добавляться фильтр нижних частот, позволяющий снизить уровень тактовой наводки, и схема двойной коррелированной выборки, подавляющая детерминированные помехи. В измерительную систему обычно включают блок выделения строки (или используют осциллограф с выделением строки) для определения уровня шумов в матричных ФПЗС. На экран осциллографа выводят нужную строку и по шумовой дорожке измеряют среднее значение напряжения шума и его неравномерность.

Намного большие возможности открывает аналого-цифровая система, функциональная схема которой изображена на рис. 2.22,б. В систему входят: блок управления, состоящий из программируемого управляющего устройства, способного составить любую тактовую диаграмму; формирователи уровней импульсных смещений (токовые ключи); блоки задания импульсных и постоянных смещений; блок обработки сигнала, включающий согласующий усилитель и отдельный блок усиления и аналого-цифрового преобразования; оперативное ЗУ; блок синхронизации; ТВ-монитор с приводом.

Перечисленные блоки управляются через магистраль, например КАМАК, связанную контроллером с универсальной шиной, к которой подключают ЭВМ, алфавитно-цифровое печатающее устройство, дисплей и др.

Система подобного рода позволяет программировать тактовые диаграммы и уровни смещений, выделять любой элемент из измеряемого массива, обрабатывать сигнал с целью увеличения отношения сигнал-шум и осуществлять статистическую обработку данных. В [18] описана аналого-цифровая система, работающая в двух режимах, стандартном телевизионном и малокадровом (500 кГц). Разработчики применили два приема, позволивших упростить систему, а именно стробоскопический ввод сигнала в память ЭВМ и считывание с остановкой регистра. Стробоскопический ввод сигнала осуществляется с одного элемента строки — в матрицу таким образом вводятся за один кадр сигналы со столбца. Останов регистра при считывании производится примерно на 2 мкс, при этом обеспечен запас по времени вывода строки, чтобы, несмотря на остановку, сигналы соседних строк не смешивались. Оба приема обусловлены низкой скоростью обмена ЭВМ с внешними устройствами и большим временем преобразования АЦП, имеющего достаточно высокую разрядность — в системе использован 13-разрядный АЦП. Система позволяет производить измерения всех фотоэлектрических параметров ФПЗС любого типа, в том числе измерения шумов с усреднением по времени или числу фотоячеек, типа и количества дефектных фотоячеек. Программно определяют белые и темные дефекты, а также их распределение по полю (при этом на экране высвечиваются границы зон качества). Цифровая память на кадр позволяет выделить на экране монитора фрагмент изображения с разным увеличением, подчеркивать градации сиг-

нала, налагать на изображения служебные метки, контуры и т. д.

Система работает не в реальном масштабе времени, и это может быть отнесено к ее недостаткам. Кроме того, при измерениях с остановом регистра приходится затрачивать большое время на ввод информации с крупноформатных матриц. Работа в реальном масштабе времени отражает истинную картину функционирования ФПЗС, но значительно усложняет систему и снижает точность измерений. К недостаткам систем, работающих в режиме непрерывного ввода на высокой частоте, следует отнести: снижение разрядности АЦП; применение усилителя с широкой полосой и большим динамическим диапазоном; необходимость работы с буферной памятью.

Дополнительные указания по эксплуатации ФПЗС могут включать методики пайки на печатные платы, предупреждение об опасности выхода прибора из строя при случайном закорачивании видеовыхода с подложкой, меры по защите от статического электричества и др.

Глава 3

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

3.1. Вопросы проектирования

Приступая к проектированию ФПЗС, разработчик, помимо теоретических представлений, например расчетных соотношений (см. гл. 1 и 2), должен опираться на экспериментальные данные о технологических возможностях. Теоретические представления являются априорными, отражают общие физические процессы и чужой накопленный опыт. К их использованию стоит относиться с известной осторожностью. Сведения о технологических возможностях носят конкретный характер, но, поскольку они сугубо статистические, следует помнить о том, достаточно ли они представительны, и периодически эти сведения приводить в соответствие с текущим состоянием технологического процесса.

Проектирование любого ФПЗС делится на два этапа: вначале определяют общий вид прибора, т. е. построение секций накопления, памяти, переноса, вид канала, способ переноса, число фаз и др., затем рассчитывают или оценивают основные параметры. При разработке логично выделить три группы наиболее существенных параметров.

В группу конструктивных включаются параметры, заданные топологией фотошаблонов и поэтому трудно изменяемые и ответственные (размеры элементов накопления, переноса и узлов выходного устройства). Рассмотрим в качестве примера трехфазную матрицу с переносом кадра. Длина (в направлении переноса) электродов в секции накопления в основном определяется воз-

возможностями фотолитографии. Желательно сделать ее минимальной, но так, чтобы не пострадала воспроизводимость процесса. Верхний предел ширины электродов секции накопления и памяти, т. е. ширины вертикальных каналов переноса, задается частотой работы выходного регистра, так как длина электрода выходного регистра равна $1/3$ ширины вертикального канала, и ее увеличение может снизить быстродействие всего ФПЗС. Практически же увеличение ширины электродов ограничивается технологическими соображениями — при заданном числе элементов желательно минимизировать площадь кристалла, чтобы повысить выход годных приборов. Задав приемлемым выходом годных и статистически определив плотность дефектов, находят максимальную площадь кристалла и ширину вертикальных каналов переноса, равную стороне кристалла, деленной на число элементов в строке. Минимальная ширина каналов переноса определяется *краевым эффектом*, который в случае поверхностного канала заключается в том, что заряд «жирного» нуля не заполняет поверхностные состояния на краях потенциальной ямы, прилегающих к стоп-каналам, и эффективность переноса в этих участках резко падает. При уменьшении ширины поверхностного канала с 20 до 10 мкм потери переноса возрастают с $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ при плотности поверхностных состояний 10^{10} эВ $^{-1}$ ·см $^{-2}$ и концентрации акцепторов в подложке $5,5 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. В случае объемного канала уменьшение ширины приводит к тому, что на краях зарядовые пакеты соприкасаются с поверхностью, и эффективность переноса резко падает до значений, характерных для поверхностного канала. Так, при ширине объемного канала n -типа, равной 10 мкм, и количестве доноров в канале $1 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ перенос электронов осуществляется без выхода на поверхность только в центральной полосе шириной 4 мкм; увеличив количество доноров до $2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$, можно расширить полосу объемного переноса до 7...9 мкм. Для задания размеров элемента накопления на фотошаблоне необходимо иметь статистические сведения о точности совмещения и уходе размеров при фотолитографии и расширении стоп-каналов в результате термических обработок. Выбрав длину и ширину электрода накопления, мы тем самым задаем площадь фотоячейки, равную площади электрода или удвоенной его площади, если накопление идет под двумя фазами. Минимальная площадь фотоячейки A_{ϕ} должна удовлетворять условию

$$A_{\phi} = \Delta N / C \Phi \Theta t_{\text{нак}} = \kappa / C \Phi \Theta t_{\text{нак}} \bar{N}_{\text{ш}}, \quad (3.1)$$

где ΔN — регистрируемая часть сигнала, связанная с числом генерируемых носителей N через контрастность C ($\Delta N = CN$); Φ — падающий поток излучения; Θ — квантовая эффективность; $t_{\text{нак}}$ — время накопления; κ — отношение сигнал-шум, выбираемое 1...6; $\bar{N}_{\text{ш}}$ — шум ФПЗС.

В (3.1) подставляют минимальные значения контрастности изображения, отношения сигнал-шум, потока излучения, времени накопления и рассчитывают шум. Впрочем, в современных ФПЗС

с объемным каналом одним из основных источников шума служит выходное устройство.

В выходном устройстве рассчитываются ширина и длина транзисторов сброса и истокового повторителя. Однако основная задача заключается в минимизации емкости узла считывания, которая зависит от ряда факторов (см. § 3.2). Одним из них является возможность получения малых размеров узла считывания.

Минимальные размеры узла считывания определяются:

уровнем фотолитографии, т. е. уверенно воспроизводимыми минимальными размерами и точностью совмещения, от которой зависит минимальный зазор между контактными окнами и краем *p-n*-перехода или поликремниевое электрода;

расширением областей истоков, стоков и плавающей диффузии при термообработке, включающей обычно отжиг после ионного легирования, окисление, геттерирование;

минимальной площадью контактного окна, обеспечивающей надежный контакт.

Если принять очень мягкие допуски на совмещение при фотолитографии (± 1 мкм) и расширение полученных ионным легированием областей (2...3 мкм), а минимальную площадь контактного окна считать равной 50 мкм², то площадь узла считывания (плавающая диффузионная область, соединения, затвор истокового повторителя) будет 900...1200 мкм². При удельной емкости оксида 10^{-8} Ф·см⁻² емкость узла считывания составит примерно 0,1 пФ.

В группу конструктивно-технологических параметров входят параметры, определяющие конструкцию ФПЗС, но не заданные фотошаблонами, а определенные технологическими режимами, т. е. более гибкие, легче изменяемые. К ним относятся: толщины диэлектрика под электродами и электродов; концентрация примеси в стоп-каналах, объемном канале, плавающей диффузионной области, истоках, стоках транзисторов, фотодиодах (ФД), если последние применяются.

Толщина подзатворного диэлектрика выбирается между верхним пределом, связанным, например, с необходимостью увеличивать напряжение на электродах в ФПЗС с поверхностным каналом, и нижним, определяемым ростом плотности дефектов в диэлектрике по мере уменьшения толщины. От толщины диэлектрика зависит также пропускание системы поликремний — диэлектрик — кремний.

Для определения минимальной толщины диэлектрика следует знать статистически достоверную зависимость плотности дефектов в слое диэлектриков от толщины. Приняв некоторый допустимый процент выхода годных структур, можно оценить максимальную плотность дефектов, а затем минимальную толщину диэлектрика.

Толщину поликремниевых электродов определяют компромиссно из соображений минимального поглощения света и максимальной электрической проводимости электродной системы.

Минимальная концентрация примеси в стоп-каналах определяется опасностью образования потенциальной ямы между каналами переноса. Верхний предел легирования связан с ростом вероятности туннельного перехода носителей в приповерхностном слое. При высоких концентрациях изгиб зон у поверхности может привести к тому, что носители (например, электроны) из валентной зоны перейдут в зону проводимости (особенно, если есть ловушки с уровнями вблизи середины запрещенной зоны). Расчет концентрации примеси в объемном канале и оценка уровня легирования фотодиодной ячейки приведены в § 3.2. Концентрация примеси в плавающей диффузионной области, истоках и стоках выбирается, как правило, максимальной, чтобы снизить сопротивление контакта к этим областям.

Группа физико-технологических параметров включает в основном сведения о поверхности: плотность поверхностных состояний; сечение захвата поверхностных ловушек; тепловую скорость; подвижность носителей в приповерхностной области. Физико-технологические параметры разрабочик может взять из литературы, если проектируемый ФПЗС близок к описываемому по своей структуре и технологии, или же использовать данные статистических измерений на тест-образцах. В [21] для определения плотности поверхностных состояний и их распределения по энергии, а также для нахождения сечения захвата поверхностных ловушек использован сам ПЗС. Разработанная методика позволила найти, что для конкретного двухфазного прибора с объемным каналом n -типа плотность поверхностных состояний и сечение захвата составляли примерно $9 \cdot 10^9$ эВ $^{-1}$ ·см $^{-2}$ и $2 \cdot 10^{-16}$ см 2 (значение энергии ловушек 0,42 эВ). Для определения физико-технологических параметров может служить измерение времени релаксации МОП-структур, проходящих все технологические термообработки.

3.2. Инженерный расчет основных узлов

Расчет ФПЗС сводится к расчету трех основных узлов: фотоячейки, канала переноса и выходного устройства.

Фотоячейка. Плотность тока фотогенерированных носителей, образующих информационный заряд $Q_{\text{инф}}$, определяется следующими факторами: пропусканием электродной системы T ; падающим потоком излучения Φ_0 ; коэффициентом поглощения излучения α ; длиной волны излучения λ ; толщиной обедненной области $d_{\text{об}}$, диффузионной длиной неосновных носителей L (см. § 2.1).

Для более простого случая МОП-накопителя толщина обедненной области равна глубине потенциальной ямы, а $L = L_n$, т. е. диффузионной длине электронов (подложка p -типа). В фотоячейке площадью A_z за время накопления $t_{\text{нак}}$ соберется заряд

$$Q_{\text{инф}} = q \Phi_0 T t_{\text{нак}} A_z \frac{\hbar c}{\lambda} \left[1 - \exp(-\alpha d_{\text{об}}) \left(1 - \frac{\alpha L_n}{1 + L_n} \right) \right]. \quad (3.2)$$

Для типичных значений $d_{\text{об}} = 10$ мкм и $L_n = 100$ мкм (время жизни

электронов 10 мкс) выражение в квадратной скобке будет близко к единице в диапазоне длин волн от самих коротких до 800 нм. При длине волны 900 нм отклонение от 1 составит 13%. Можно, следовательно, для видимого диапазона принять, что

$$Q_{\text{инф}} \approx q \Phi_0 T t_{\text{нак}} A_0 \hbar c / \lambda.$$

Поток излучения и время накопления обычно задаются условиями работы системы, для которой разрабатывается данный ФПЗС. Площадь фоточувствительной ограничивается снижением выхода годных приборов. Единственный способ увеличения информационного пакета заключается в улучшении пропускания электродной системы. В диапазоне длин волн ниже 500 нм входящий в кремний поток фотонов определяется поглощением поликремниевых электродов. Для длин волн 500...800 нм доминируют интерференционные эффекты в системе воздух — поликремний — диэлектрик. Излучение с длиной волны более 800 нм мало поглощается электродной системой, проходит вглубь кремния, и величина информационного пакета определяется рекомбинацией фотогенерированных носителей.

В табл. 3.1 приведены значения коэффициентов преломления n_1 и поглощения α для слоя поликремния 0,27 мкм, не легированного и легированного фосфором с дозой ионов $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ [21].

На поверхности поликремниевых электродов, как правило, формируют слой защитного оксида, толщину которого также следует учитывать при расчете пропускания. Даже для монохроматического излучения расчет пропускания достаточно сложен [2]. Для упрощения фиксируют толщину какого-либо слоя, например подзатворного диэлектрика. При толщине оксида 0,125 мкм оптимальные толщины защитного оксида d_1 и поликремния d_2 для длины волны 600 нм находятся из соотношений [2]: $d_1 = 0,206 + 0,206m$; $d_2 = 0,073 + 0,0765m$, где $m = 0, 1, 2, \dots$ Увеличение толщины подзатворного диэлектрика вызывает увеличение пропускания, а максимум пропускания (около 600 нм) сдвигается в сторону длинных волн. Например, увеличение толщины подзатворного оксида с 0,1 мкм до 0,18 мкм приводит к росту пропускания в максимуме [1] с 50 до 80%.

Таблица 3.1

Зависимость поглощения слоя поликремния от длины волны излучения

Длина волны, нм	n_1		$\alpha (10^4 \text{ см}^{-1})$	
	Нелегированный	Легированный	Нелегированный	Легированный
400	5,48	5,51	22,7	14,2
500	4,43	4,31	3,7	2,04
600	4,02	3,92	0,98	0,75
700	3,81	3,72	0,34	0,37

Несмотря на сложность расчетов, теоретическая спектральная зависимость пропускания, квантового выхода или чувствительности может хорошо совпадать с экспериментальной, как это видно на рис. 3.1. Эти зависимости относятся к оптимизированной по данным расчетов матрице ФПЗС с кадровым переносом [19], с толщинами слоев подзатворного оксида 0,16 и поликремния 0,17 мкм. Толщину поликремния следует выдерживать с высокой точностью, поскольку зависимость пропускания от толщины имеет вид периодической функции (см. рис. 2.2) с очень резкими спадами и подъемами.

При расчете толщины поликремния в матрицах с кадровым переносом приходится идти на компромисс: снижение толщины улучшает пропускание, но приводит к увеличению сопротивления электрода.

В матрицах ФПЗС с большим числом элементов поликремниевые шины имеют протяженность 7...9 мм. С ростом сопротивления шины возрастает рассеиваемая при тактировании мощность. Кроме того, из-за падения напряжения на шине, средние ее участки будут находиться под меньшим потенциалом, чем крайние. В [22] поликремниевые шины рассмотрены как RC -система с распределенными параметрами и показано, что верхняя граница поверхностного сопротивления при частотах около 1 МГц составляет примерно 200 Ом; рекомендовано учитывать при расчете шин сопротивление генератора тактовых импульсов (чем оно выше, тем меньше мощность, выделяемая на шинах). Выбор толщины подзатворного диэлектрика в матрицах с кадровым переносом связан также не только с пропусканием излучения, но и с зарядовой емкостью и напряжением на фазках (см. гл. 1).



Рис. 3.1. Зависимость квантового выхода от длины волны для матрицы ФПЗС с оптимизированными толщинами слоев оксида и поликремния

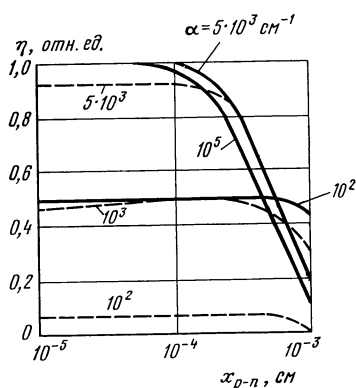


Рис. 3.2. Зависимость квантового выхода фотоиода от глубины залегания металлургической границы перехода для нескольких значений α и диффузионной длины носителей $2 \cdot 10^{-2}$ см и 10^{-3} см (штриховая линия)

Расчет фотодиодной ячейки несколько сложнее, чем МОП-накопителя, поскольку помимо пропускания играют роль глубина p - n -перехода и концентрация примеси, вводимой в подложку при формировании p - n -перехода. Квантовый выход ФД с резким p - n -переходом, образованным областью n -типа на p -подложке, представляет собою квантовый выход перехода, индуцированного полем (т. е. МОП-накопителя), умноженный на $\exp(-\alpha x_n)$, где x_n — толщина обедненного слоя n -области. Суммарная толщина обедненных слоев в n - и p -областях зависит от концентрации легирующей n -область примеси, профиля легирования и смещения на переходе. Если контакт к n -области не предусмотрен, смещение можно регулировать с помощью емкостной связи, изменяя потенциал на перекрывающем n -область электроде, например барьерном электроде в линейных ФПЗС.

Наибольший эффект применение фотодиодов вместо МОП-накопителей дает в коротковолновой области спектра. Поэтому представляет интерес исследование квантовой эффективности ФД на 0,4...0,45 мкм. В [11] рассмотрены причины снижения квантовой эффективности неглубоких ФД в коротковолновой части спектра (0,42 мкм) по сравнению со средневолновым участком. Основную роль играет уровень легирования n -области — при высоких концентрациях наступает резкое уменьшение эффективного времени жизни носителей и идет интенсивная рекомбинация. Например, при средней концентрации доноров 10^{17} см $^{-3}$ время жизни в n -области составляло 100 нс, а при концентрации 10^{20} см $^{-3}$ падало до 1 нс. Кроме того, при концентрациях более 10^{18} см $^{-3}$ начинает сказываться изменение (уменьшение) ширины запрещенной зоны, которое приводит к возникновению поля, не способствующего, а, напротив, препятствующего движению к переходу носителей, генерированных светом. При увеличении глубины p - n -перехода с сильнолегированной n -областью вклад обедненного слоя в этой области уменьшается, время жизни носителей и квантовая эффективность растут.

На практике предпочитают снижать концентрацию донорной примеси (поверхностная концентрация составляет примерно 10^{17} см $^{-3}$ [23]) и оставлять глубину перехода на уровне 0,5...1 мкм. На рис. 3.2 показано, что до глубины перехода 1 мкм квантовый выход фотодиода с концентрацией примеси 10^{17} см $^{-3}$ равен единице; при больших глубинах он начинает резко падать в случае сильного поглощения (кривая для $\alpha = 10^5$ см $^{-1}$, что соответствует длине волны 0,4 мкм). На выбор концентрации n -области влияет также необходимость обеспечить полное удаление накопленных фотодиодом носителей. Рис. 3.3,а иллюстрирует ситуацию, возникающую при считывании с фотодиода под прилегающий МОП-электрод (разрешающий затвор, фазовый электрод и др.). В первый период переноса разность потенциалов фотодиода $\Phi_{\text{фд}}$ и дна принимающей потенциальной ямы под МОП-электродом $\Phi_{\text{я}}$ велика, и накопленные в n -области электроны быстро перетекают в потенциальную яму. По мере уменьшения этой разности процесс пере-

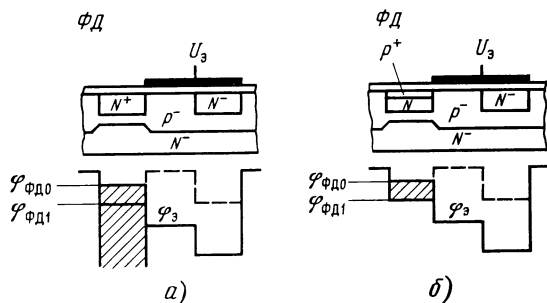


Рис. 3.3. Перенос носителей из обычного фотодиода (а) и фотодиода с полностью обедняемой n-областью и дополнительным p^+ -слоем (б)

текания замедляется, при $\varphi_{ФД1} - \varphi_3 \approx 300$ мВ он переходит в *субпороговый режим* и практически останавливается. Оставшиеся в n-области электроны присоединяются к информационному зарядовому пакету следующего кадра, и в результате произойдет наложение картин, появится инерционность, весьма похожая на ту, которая наблюдается в видеоканах. Особенно отчетливо инерционность ФД проявляется при низких уровнях освещенности. Избавиться от этого эффекта можно, понизив концентрацию примеси в n-области настолько, чтобы область полностью обеднялась, т. е. толщина обедненного слоя равнялась металлургической глубине перехода. В этом случае, как показано на рис. 3.3,б, распределение потенциала в n-области ничем не отличается от обычной потенциальной ямы МОП-накопителя. Дно потенциальной ямы $\varphi_{ФД1}$ должно находиться выше дна принимающей ямы на значение, несколько превышающее 300 мВ. Соблюдение этого условия позволит передать накопленный ФД заряд полностью до наступления субпорогового состояния, инерционность в результате подавляется. Изображенный на рис. 3.3,б ФД содержит дополнительную область p^+ -типа. Добавление p-области желательно по следующим причинам [23]: резко возрастает зарядовая емкость ФД, так как последовательно с основным переходом включается p^+ -n-переход; исключается контакт информационных носителей с поверхностью раздела диэлектрик — полупроводник, а сама граница раздела предохраняется от обеднения, что снижает темновые токи. На рис. 3.4 приведено распределение примеси в фотодиодной ячейке и прилегающей части считывающего регистра современной СКП-матрицы с p-карманом [23]. Глубина p^+ -области составляет 150 нм, концентрация примеси в n-области меньше, чем 10^{17} см $^{-3}$. Расчетное значение потенциала обеднения такого фотодиода составляет примерно 5,5 В, а емкость на порядок больше, чем у обычного фотодиода без p^+ -области.

Фотодиод, расположенный в p-кармане, образует с подложкой вертикальный n-p-n-транзистор, работающий в области прокола и обеспечивающий сток избыточных носителей из фотодиода в подложку (см. § 2.3). Ток прокола $I_{пр}$ такой транзисторной структуры определяется потенциалом фотодиода $U_{ФД}$ [24]

$$I_{пр} = A \exp(-BU_{ФД}), \quad (3.3)$$

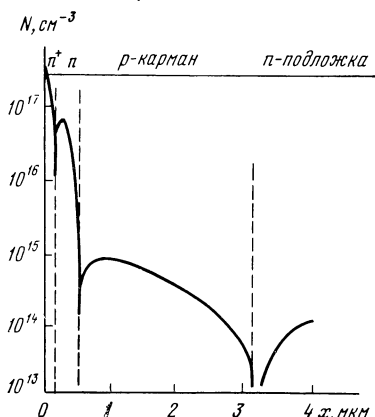


Рис. 3.4. Распределение примеси в фотодиодной ячейке с p^+ -слоем, в p -кармане и подложке СКП-матрицы

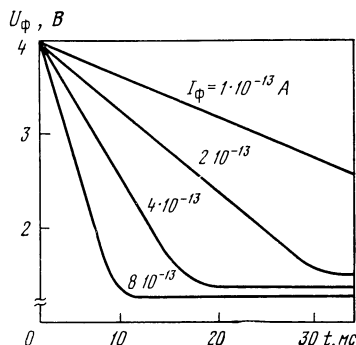


Рис. 3.5. Вертикальный антиблуминг — зависимость потенциала фотодиода от времени

где A и B — постоянные, зависящие от смещения подложки и конструктивно-технологических параметров. По мере накопления ФД носителей, генерированных излучением, потенциал ФД уменьшается от начального значения $U_{ФД0}$, а общий фототок $I_{ФД}$ и ток прокола возрастают. Связывает эти величины выражение

$$C_{ФД} dU_{ФД}/dt = -(I_{ФД} - I_{пр}), \quad (3.4)$$

где $C_{ФД}$ — емкость фотодиода.

Подставив (3.3) в (3.4) и произведя интегрирование левой части по времени от $t=0$ ($U_{ФД} = U_{ФД0}$) до $t = t_{нак}$ ($U_{ФД} = U_{ФДmin}$), получим

$$C_{ФД} (U_{ФДmin} - U_{ФД0}) + \log \{ [I_{ФД} - A \exp(-BU_{ФДmin})] / [I_0 - B \exp(-BU_{ФД0})] \} / B.$$

Здесь момент $t = t_{нак}$ соответствует снижению потенциала фотодиода до некоторой предельной величины $U_{ФДmin}$, при которой ток прокола становится равным фототоку, и начинается сток избыточных носителей. На расчетных зависимостях рис. 3.5 видно, что потенциал фотодиода уменьшается со временем линейно (при расчетах принимали, что емкость фотодиода $C_{ФД} = 0,0024$ пФ, потенциал подложки 15 В и начальный потенциал фотодиода $U_{ФД0} = 4$ В). При больших $U_{ФД}$ ток прокола очень мал, но он возрастает экспоненциально с уменьшением $U_{ФД}$. Через некоторое время потенциал диода из-за резкого возрастания тока прокола перестает меняться, достигнув минимального значения. Это значение немного уменьшается с увеличением фототока. Исходный потенциал фотодиода $U_{ФД0}$ устанавливают смещением перекрывающегося с n -областью электрода. В [24] отмечается, что потенциал $U_{ФД}$ и потенциал подложки изменяются весьма незначительно в широких

пределах изменения фототока, а следовательно, и освещенности. Так, например, при изменении освещенности на два порядка потенциал подложки изменяется всего на 1 В. Это означает, что вертикальный сток эффективно подавляет локальные пересветки.

Канал переноса. При расчете канала переноса любого типа (поверхностного или объемного, с индуцированными или встроенными потенциальными барьерами) основной интерес представляет *максимальная (удельная) зарядовая емкость*. В поверхностном канале, где глубина потенциальной ямы определяется поверхностным потенциалом, для оценки зарядовой емкости используется (1.9), из которого следует, что зарядовая емкость равна $Q_{\text{инф}} = \varphi_{\text{пов}} C_d$, где C_d — удельная емкость диэлектрика, и пропорционально увеличивается с ростом емкости диэлектрика и поверхностного потенциала. Последний возрастает по мере снижения концентрации примеси в подложке (см. рис. 1.7) и увеличения смещения на электроде. Увеличение смещения ограничивается напряженностью поля, при которой наступает пробой диэлектрика. Для диоксида кремния эта величина составляет $(1 \dots 5) \cdot 10^6$ В·см, т. е. максимальный заряд равен $Q_{\text{max}} = \epsilon_0 \epsilon_d E_{\text{max}} \approx 1 \cdot 10^{13}$ эл·см⁻².

Приблизиться к предельному значению можно в поверхностном канале с индуцированными потенциальными барьерами, так как здесь глубина потенциальной ямы определяется только разностью смещений, приложенных между электродом хранения и барьерным. На рис. 3.6 приведена полезная для расчетов зависимость (кривая 1) поверхностного потенциала от смещения на электродах, построенная по (1.9). На электроды хранения подается смещение высокого уровня $U_{\text{э.в.}}$, на барьерный — низкого $U_{\text{э.н.}}$, разность $U_{\text{э.в.}} - U_{\text{э.н.}}$ и определяет $\Delta \varphi_{\text{пов}}$ и $Q_{\text{инф}}$ поверхностного канала с индуцированными потенциальными барьерами. В случае поверхностного канала со встроенными потенциальными барьерами следует построить две зависимости, примерно параллельные друг другу, — для областей хранения (1) и барьерных (2), отличающихся концентрацией примеси (см. рис. 3.6). Зарядовая емкость задается

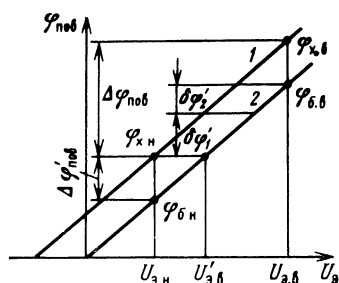


Рис 3.6. Зависимость поверхностного потенциала от смещения на электродах для поверхностного канала с индуцированными и встроенными потенциальными барьерами

уже не разностью приложенных смещений (к областям хранения и барьерной приложено одно и то же смещение), а разностью $\Delta N = N_{\text{АВ}} - N_{\text{А}}$, где $N_{\text{АВ}}$ — концентрация примеси в барьерной области. Зависимости на рис. 3.6 изображены для упрощения картины параллельными прямыми, хотя форма их и расстояние между ними зависят от уровня смещения на электроде (см. рис. 1.7).

При изменении смещения на электродах от низкого до высокого уровня устанавливаются четыре значения поверхностных потенциалов $\varphi_{\text{б.н.}}$, $\varphi_{\text{б.в.}}$ в барьерной области и $\varphi_{\text{х.н.}}$, $\varphi_{\text{х.в.}}$ в облас-

ти хранения соответственно. Максимальную зарядовую емкость можно определить, проведя прямую параллельно оси ординат, для какого-либо смещения на электроде, например для низкого уровня $U_{э.н}$ (рис. 3.6), равного смещению на подложке. Пересечение прямой с параллельными зависимостями даст значение разности поверхностных потенциалов (при пустых потенциальных ямах), определяющей зарядовую емкость: $\Delta\phi'_{пов} = \phi_{б.н} - \phi_{х.н}$.

Оценку разности поверхностных потенциалов легко произвести, используя рис. 1.7; если задать $N_A = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $N_{AB} = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, то при смещении, равном, например, 12 В, разность поверхностных потенциалов составит $\Delta\phi'_{пов} = 2 \text{ В}$. В канале переноса со встроенными барьерами разность поверхностных потенциалов и зарядовая емкость намного меньше, чем в канале с индуцированными барьерами.

Если через точку $\phi_{х.н}$ на оси ординат рис. 3.6, соответствующую потенциалу области хранения при низком уровне смещения, провести прямую, параллельную оси абсцисс, то пересечение ее с зависимостью $\phi_{пов} = \phi(U_{э})$ для барьерной области даст значение верхнего уровня смещения, при котором глубины потенциальных ям обеих областей сравниваются. Очевидно, что для эффективного переноса поверхностный потенциал барьерной области должен быть больше на некоторую величину $\delta\phi'_1$ потенциала области хранения (т. е. дно потенциальной ямы хранения должно подняться выше потенциального барьера). Кроме того, следует учесть технологические разбросы, например колебания концентрации примеси, вводимой путем ионного легирования, и дополнительно увеличить потенциал на $\delta\phi'_2$. Суммарное значение $\delta\phi'_1 + \delta\phi'_2$, обеспечивающее эффективность переноса и технологический запас, показано на рис. 3.6; видно, что рабочий верхний уровень смещения должен быть значительно увеличен с $U'_{э.в}$ до $U_{э.в}$, хотя максимальная зарядовая емкость будет определяться меньшим смещением $U'_{э.в}$. В поверхностном канале потенциальную яму в области хранения можно заполнять носителями заряда полностью, независимо от того, образована она разностью смещений или концентраций примеси. В объемном канале (см. гл. 1), заполнение ямы ограничено дополнительно условием, — зарядовый пакет не должен касаться поверхности раздела. В объемном канале зарядовая емкость определяется не поверхностным потенциалом, а потенциалом максимума $\phi_{\text{мах}}$ (см. рис. 1.12), который устанавливается при смещении канала относительно подложки $U_{об}$, обеспечивающем полное обеднение канала, $\phi_{\text{мах}} = \phi_{об} = U_{об} + \phi_{pn}$, где ϕ_{pn} — встроенный потенциал перехода канал — подложка.

Формула (1.11), позволяет определить потенциал максимума в предположении, что концентрация примеси в канале N_d много выше, чем в подложке N_A . Максимальная зарядовая емкость определяется двумя условиями: потенциал области хранения после заполнения ямы зарядовым пакетом становится равным потенциалу $\phi_{\text{мах}б}$ пустой барьерной области, точнее, не может приблизиться к нему на величину, меньшую некоторой $\delta\phi_{\text{мах}}$ (так же, как и в

случае поверхностного канала); зарядовый пакет не должен касаться поверхности раздела полупроводник — диэлектрик.

Пусть обе соседние области (хранения и барьерная) находятся под одинаковым смещением, равном нижнему уровню тактовых импульсов $U_{э,н}$, и к каналу приложено такое смещение $U_{об}$, что он полностью обеднен (если обеднена область хранения, то барьерная область с меньшей концентрацией примеси заведомо обеднена). Если затем к электроду хранения приложить смещение верхнего уровня $U_{э,в}$, глубина ямы хранения увеличится и в нее можно будет поместить зарядовый пакет. Первое из указанных выше условий ограничивает зарядовый пакет величиной, определяемой из выражения [2]:

$$Q_{\max} = \sqrt{2qN_d\epsilon_{\pi}\epsilon_0} \left[\sqrt{\Phi_{об} - U'_{э,н} + \left(\frac{\kappa'}{2}\right)^2} - \sqrt{\Phi_{об} - U_{об} + \left(\frac{\kappa'}{2}\right)^2} \right]. \quad (3.5)$$

Рис. 3.7,а иллюстрирует эту ситуацию: на нем показаны распределения потенциалов под электродами хранения и барьерным при различных уровнях смещения и при заполнении потенциальной ямы хранения зарядом. Кривая 1 относится к обеим областям: распределения потенциала в них совпадают, так как оба электрода находятся под одним и тем же потенциалом $U_{э,н}$, а канал обеднен смещением $U_{об}$. Распределение в области хранения без зарядового пакета при смещении $U_{э,в} > U_{э,н}$ представлено кривой 2. Потенциальная яма, более глубокая, чем под соседним барьерным электродом, готова к приему заряда. При заполнении ямы зарядом, распределение постепенно переходит от кривой 2 к 3. Заряд локализуется в слое, расположенном слева от границы обедненного слоя p - n -перехода x_n . По мере заполнения область, занятая зарядом, расширяется к поверхности (правая граница в точке x_n остается неизменной). Видно, что при выбранном значении верхнего

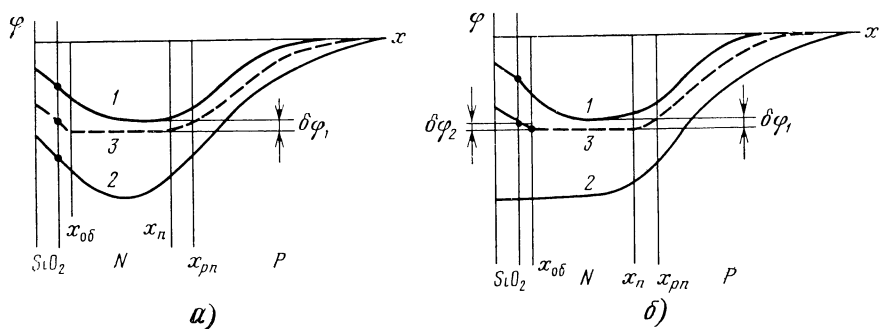


Рис. 3.7. Распределение потенциала в объемном канале n -типа для двух случаев ограничения заполнения зарядом потенциальной ямы под электродом хранения — перелив в соседнюю яму (а) и одновременно перелив в соседнюю яму и контакт с поверхностью (б)

уровня смещения потенциал заполненной ямы хранения приблизился к потенциалу дна барьерной ямы на расстояние $\delta\phi_1$. Дальнейшее увеличение заряда невозможно, он перельется под барьерный электрод. Однако от поверхности раздела зарядовый пакет еще достаточно далек, он отделен обедненным поверхностным слоем $x_{об}$. Очевидно, что, увеличивая верхний уровень смещения, можно увеличивать зарядовый пакет до тех пор, пока не вступит в силу и второе ограничение. Соответствующие кривые распределения потенциала показаны на рис. 3.7,б. Кривая 2 идеализирована, она представляет предельный случай для пустой ямы хранения, когда верхний уровень смещения равен напряжению обеднения канала. При заполнении ямы зарядом (кривая 3) выполнены оба условия: от дна пустой ямы заряд отделен потенциальным барьером $\delta\phi_1$, от поверхности — потенциальным барьером $\delta\phi_2$. Величина максимального зарядового пакета получается из (3.5) подстановкой $U_{об} + \phi_{pn}$:

$$Q_{\max} = q N_D \left(x_{pn} - \sqrt{\frac{2 \varepsilon_n \varepsilon_0 (U_{об} + \phi_{pn})}{q N_D (1 + N_D/N_A)}} \right) = \\ = q N_D x_{pn} - \sqrt{2 q N_A \varepsilon_n \varepsilon_0 (U_{об} + \phi_{pn})}. \quad (3.6)$$

Произведение $q N_D x_{pn}$, равное полному заряду доноров в канале, представляет предельную и недостижимую величину зарядового пакета. Чтобы приблизиться к ней, следует уменьшать концентрацию примеси в подложке. На рис. 3.8,а приведены рассчитанные по (3.6) зависимости нормализованного заряда $Q_{\max}/q N_D \times x_{pn}$ от концентрации акцепторов в подложке при заданном верхнем уровне смещения $U'_{эв} = 10$ В для различных значений $N_D x_{pn}$, из которых видно, что чем больше $N_D x_{pn}$, тем слабее влияет концентрация примеси в подложке. Предел увеличения $N_D x_{pn}$ объемного канала определяется пробоем, как и в случае поверхностного канала, но не диэлектрика, а p - n -перехода канал — подложка

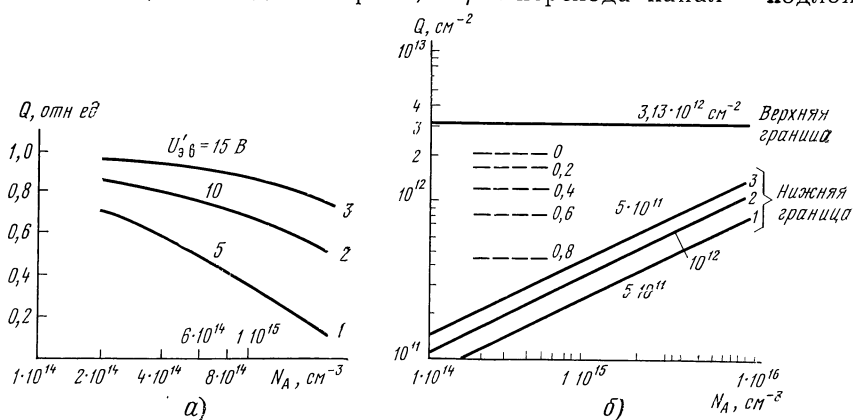


Рис. 3.8. Расчетные зависимости для объемного канала n -типа:
а — нормализованного заряда от концентрации акцепторов N_A в подложке; б — дозы ионов от концентрации в подложке при $U'_{эв} = 10$ В

ка. При низком уровне смещения напряженность у поверхности велика (см. рис. 3.7,а) и переход пробивается по поверхности. При высоком уровне смещения наибольшая напряженность создается в объеме кремния. Для типичных высокоомных подложек и резкого p - n -перехода с малым радиусом кривизны поверхностный пробой наступает раньше, чем пробой в объеме, и определяющей является максимальная напряженность поля у поверхности. Для обычных концентраций примеси в объемном канале эта максимальная напряженность $E_{\max} = (5 \dots 8) \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-2}$, т. е. верхний предел зарядовой емкости составляет $Q_{\max} = E_{\max} \epsilon_n \epsilon_0 = q N_D x_{pn} = 5 \cdot 10^5 \cdot 10^{-12} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-2} = 3,13 \cdot 10^{12} \text{ эл} \cdot \text{см}^{-2}$. Предельное значение является завышенным, так как практически всегда объемный канал соприкасается с высоколегированными стоп-канальными областями. Максимальная напряженность поля у поверхности будет при этом определяться в большей мере концентрацией примеси в стоп-канальной области и составит $(3 \dots 5) \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{см}^{-2}$. Верхний предел зарядовой емкости объемного канала не зависит от концентрации примеси в подложке и определяется только характерной величиной — произведением глубины канала на концентрацию примеси в нем, т. е. дозой введенной примеси (канал создается ионным легированием). На рис. 3.8,б (штриховые линии показывают заполнение потенциальной ямы 0...80% от максимального) это отражено прямой, параллельной оси абсцисс, по которой откладывается концентрация примеси в подложке.

Нижний предел произведения $N_D x_{pn}$ связан со вторым условием, при переключении смещения с низкого уровня на высокий заряд, хранящийся в потенциальной яме, не должен соприкасаться с поверхностью. Можно записать

$$x_{pn} \approx x_n = [2 \epsilon_n \epsilon_0 N_A U'_{э.в} / q N_D (N_D + N_A)]^{1/2}.$$

Допустим, что $N_D \gg N_A$, тогда получим нижний предел дозы и, следовательно, зарядовой емкости

$$Q_{\min} = q N_D x_{pn} \geq 2 \epsilon_n \epsilon_0 N_A U'_{э.в}. \quad (3.7)$$

Из (3.7) следует, что для $N_D \gg N_A$ нижний предел дозы не зависит от глубины канала и концентрации примеси в нем, а определяется только подложкой, линейно увеличиваясь с ростом концентрации акцепторов, как показано на рис. 3.8,б.

Выражения (3.5)—(3.7) получены при условии равномерного распределения примеси в канале. Такое допущение наиболее соответствует эпитаксиальной разнотипной структуре, где пленка толщиной 3...5 мкм выполняет функции объемного канала. В современных ПЗС, стремясь к увеличению зарядовой емкости, объемный канал выполняют мелким (0,5...1 мкм). Для формирования мелкого канала используют ионное легирование, реже — диффузию. Распределение примеси после введения ее ионным легированием с последующим диффузионным отжигом близко к гауссовскому. Если энергия ионов подобрана таким образом, что проецированный пробег превышает толщину диэлектрика, то распределение приме-

си в канале может иметь *колоколообразную* форму, которая аппроксимируется степенными функциями. Расчет зависимости потенциала от расстояния вглубь полупроводника для трех возможных видов распределения примеси: равномерного, гауссовского и колоколообразного (средняя концентрация примеси и глубина *p-n*-перехода во всех случаях считалась одинаковой) — показал, что равномерно легированный канал является худшим случаем и что подбором распределения примеси в канале можно значительно увеличить зарядовую емкость.

Кроме того, заполнение потенциальной ямы зарядом в канале с колоколообразным распределением, имеющим пик на расстоянии 1 мкм от границы раздела, вызывает изменение потенциала максимума $\Delta\varphi_{\text{max}}$ в 2 раза меньше, чем в однородно легированном канале. Не только выбор дозы, но и энергия ионов влияет на величину зарядовой емкости. Обычно стремятся вводить примесь после того, как создана подзатворная система, например оксид — нитрид кремния (см. § 3.3). Зависимость зарядовой емкости от энергии ионов для практической задачи ионного легирования бором и мышьяком через слой оксида толщиной 95 нм и нитрида кремния толщиной 65 нм исследована в [25]. При малых энергиях зарядовая емкость быстро возрастает, это объясняется увеличением количества примеси в кремнии. После некоторого значения энергии (70 для бора и 500 кэВ для мышьяка) количество примеси в кремнии перестает расти, а глубина *p-n*-перехода продолжает увеличиваться. Увеличение глубины объемного канала при неизменном количестве примеси приводит к уменьшению зарядовой емкости. Таким образом, зависимость зарядовой емкости от энергии ионов имеет максимум при определенном значении энергии, которое следует определить экспериментально для конкретной конструкции и технологии проектируемого ПЗС.

Для объемного канала удобно использовать так же, как и для поверхностного, зависимости потенциала от смещения на электродах с той разницей, что на оси ординат откладывают не поверхностный потенциал, а потенциал максимума (область хранения 1) рис. 3.9. Характерным отличием является то, что зависимость идет не из начала координат, а отсекает на оси абсцисс некоторое значение, равное потенциалу максимума при отсутствии смещения на электроде, а точнее, при $U_3 - U_{\text{п.з}} = 0$. Для объемного канала со встроенными потенциальными барьерами строят две зависимости — для областей хранения (1) и барьерный (2), по которым определяют, проводя прямую, параллельную оси ординат (напри-

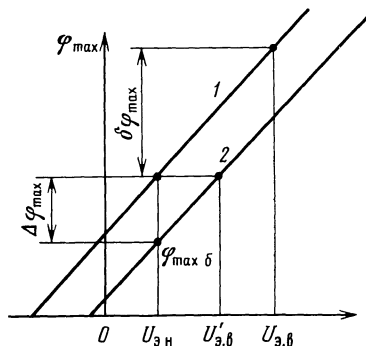


Рис. 3.9. Зависимость потенциала максимума от смещения на электродах для объемного канала со встроенными потенциальными барьерами

мер через точку, соответствующую нижнему уровню смещения на электродах), максимальную разность $\Delta\varphi_{\max}$, обеспечиваемую разницей концентрации примеси в областях хранения и барьерных. Прямая, проведенная параллельно оси абсцисс через точку ($\varphi_{\max\delta} + \delta\varphi_{\max}$) на оси ординат, даст значение верхнего уровня смещения.

Подчеркнем, что «потенциальный запас» $\delta\varphi_{\max}$ в случае объемного канала больше (относительно $\varphi_{\max\delta}$), чем в случае поверхностного, так как помимо учета технологических вариаций и барьера, остающегося между заполненной ямой хранения и пустой барьерной, необходимо добавить потенциальный барьер, который должен оставаться между зарядовым пакетом и поверхностью раздела. Максимальная зарядовая емкость, реализуемая в объемном канале со встроенными потенциальными барьерами, находится из выражения [2]:

$$Q_{\max} = q N_{\text{дх}} \left\{ x_{pn} - \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\text{п}}\varepsilon_0}{q N_{\text{дх}}}} \times \right. \\ \left. \times \left[\sqrt{\varphi_{\text{м.б}} - U'_{\text{э}} + \left(\frac{K'_{\text{б}}}{2}\right)^2} - \frac{K'_{\text{б}}}{4} + \sqrt{\frac{\varphi_{\text{мб}}}{1 + N_{\text{дх}}/N_{\text{дб}}}} \right] \right\}, \quad (3.8)$$

где $N_{\text{дх}}$, $N_{\text{дб}}$ — концентрация примеси (доноров) в области хранения и барьерных; $\varphi_{\max\delta}$ — максимум потенциала в барьерной области при верхнем уровне смещения $U'_{\text{э}}$; $K'_{\text{б}}$ — коэффициент влияния обедненного слоя доноров барьерной области $K'_{\text{б}} = \sqrt{2qN_{\text{дб}}\varepsilon_{\text{п}}\varepsilon_0/C_{\text{д}}}$.

Из (3.8) следует, что для увеличения зарядовой емкости надо увеличивать разность концентраций примеси в областях хранения и барьерной (а также их абсолютную величину) и снижать потенциал обеднения барьерной области. Сравнивая (3.8) с аналогичным выражением (3.5) для объемного канала с индуцированными потенциальными барьерами, видим, что разность смещений заменена разностью концентраций примеси (как и для поверхностного канала). Доза примеси $N_{\text{дб}}x_{pn}$, необходимая для создания области хранения со встроенным потенциальным барьером, находится в предположении, что глубина p - n -перехода в областях хранения и барьерной одна и та же: $N_{\text{дб}}x_{pn} = N_{\text{дх}}x_{pn} \left(1 - \frac{Q_{\max}}{g N_{\text{дх}}x_{pn}}\right)$, где Q_{\max} — максимальный заряд, уместяющийся в потенциальной яме хранения с учетом всех ограничений.

На рис. 3.8,б отложены предельные значения доз имплантации (штриховые линии), необходимые для размещения в потенциальной яме заряда, составляющего некоторую часть 0,2 ... 0,8 от максимального. Расчет произведен для $N_{\text{дх}}x_{pn} = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, при $N_{\text{дб}}x_{pn} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в потенциальной яме можно разместить 80% максимального заряда. Величина зарядовой емкости зависит не только от разности смещений на соседних электродах (или разности концентрации), но и от уровня смещения. Если амплитуда

тактовых импульсов равна 10 В, то не все равно, будет ли это разность между 20 и 10 В или между 12 и 2 В.

В [26] проведен анализ подобной зависимости для однородного легированного объемного канала. Для выбора оптимального уровня смещений надо знать предельные значения. Снизу диапазон смещений (например, электрода хранения, так как разность смещений фиксирована) ограничен тем, что смещение барьерного электрода, на который всегда подается меньшее смещение, чем на электрод хранения, станет отрицательным, и под ним возникнет инверсный слой, заполняемый дырками из стоп-канальных областей p^+ -типа. Дальнейшее уменьшение смещения электрода хранения бессмысленно, потенциал максимума обедненного канала останется неизменным (слой дырок экранирует внешнее поле) и равным [26]

$$\Phi_{об.инв} = q N_D x_{pn}^2 (N_D + N_A) / 2 \epsilon_{п} \epsilon_0 (\sqrt{N_D + N_A} + \sqrt{N_A})^2.$$

Смещение $U_{инв}$ на барьерном затворе равно

$$U_{инв} = q N_D x_{pn} \sqrt{N_D + N_A} / C_D (\sqrt{N_D + N_A} + \sqrt{N_A}).$$

Верхний предел смещений электрода хранения обусловлен пробоем, и для конкретной конструкции ПЗС существует некоторое предельное напряжение $U_x = U_{пр}$.

На рис. 3.10 (стрелка показывает изменение смещения на электроде хранения, позволяющее достичь максимума зарядовой емкости) приведена зависимость потенциала максимума под барьерным затвором $\Phi_{max \delta}$ от напряжения на нем U_δ . Именно эта зависимость важна при выборе уровня смещений, так как она является границей увеличения смещения на электроде хранения. Потенциал заполненной зарядом ямы хранения не должен приближаться к потенциалу максимума барьерной ямы на некоторую величину $\delta\phi$, которая в [26] для упрощения принята равной нулю. Возможны две ситуации: при малых дозах легирования канала инверсия наступает при небольших отрицательных значениях U_δ

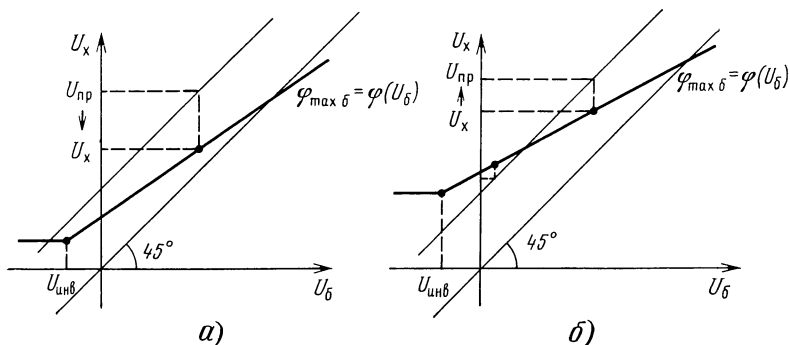


Рис. 3.10. Зависимость потенциала максимума объемного канала от смещения на электродах хранения и барьерном при фиксированной разности смещений для малых (а) и больших (б) доз легирования

и потенциал $\varphi_{\max 6}$ во всем диапазоне изменений U_6 невелик (рис. 3.10,а); при больших дозах легирования $U_{\text{инв}}$ велико, зависимость $\varphi = f(U_6)$ идет гораздо выше (рис. 3.10,б). В первом случае зарядовую емкость ограничивает контакт заряда в яме хранения с поверхностью при любых значениях смещения на электроде хранения U_x . На рис. 3.10,а видно, что при $U_6 = U_{\text{инв}}$, $U_x > \varphi_{\max 6}$, а $U_{\text{пр}} > \varphi_{\max 6}$. Если $U_x > \varphi_{\max 6}$, то, как показано в [26], смещение на электроде хранения можно уменьшать до значения $U_x = \varphi_{\max 6}$. Уменьшение U_x вызывает увеличение зарядовой емкости, так как уменьшается ширина обедненного слоя p - n -перехода и при $U_x = \varphi_{\max 6}$ достигается максимальная зарядовая емкость.

Во втором случае в качестве ограничения зарядовой емкости выступает *перелив* заряда ямы хранения в потенциальную яму барьерного электрода. Здесь (см. рис. 3.10,б) при $U_6 = U_{\text{инв}}$ минимальное $U_x < \varphi_{\max 6}$, а максимальное $U_x = U_{\text{пр}}$ может быть больше или меньше $\varphi_{\max 6}$. Если $U_{\text{пр}} > \varphi_{\max 6}$, то при $U_x = U_{\text{пр}}$ достигается максимальная зарядовая емкость. Если же $U_{\text{пр}} < \varphi_{\max 6}$, достичь максимальной зарядовой емкости, не удастся, так как для этого необходимо выполнить условие $U_{\text{пр}} = \varphi_{\max 6}$.

Выходное устройство. Выходной сигнал пропорционален частному от деления информационного зарядового пакета на емкость узла считывания, т. е. надо стремиться к уменьшению емкости узла считывания. Действительно, эта задача является в любом случае первоочередной, однако, проектируя выходное устройство, приходится учитывать ряд факторов: топологию и режим работы выходного устройства; технологические особенности изготовления ПЗС; область применения (от нее зависит минимальная и максимальная величина информационного заряда).

Типовая схема узла считывания с плавающей диффузионной областью приведена на рис. 3.11. Сужающаяся часть канала переноса слева на рисунке заканчивается плавающей диффузионной областью, которая с помощью контактного окна (отмечено крес-

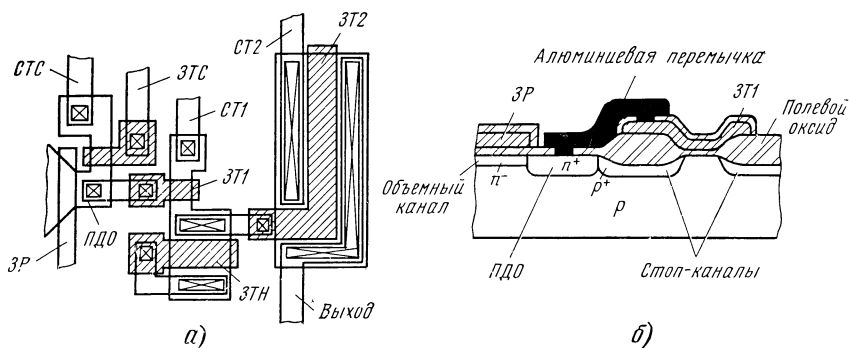


Рис. 3.11. Типовая конструкция выходного двухкаскадного устройства (а) и сечение узла считывания (б):

ЗВ — выходной затвор; СТЗ, ЗТС — сток и затвор транзистора сброса; СТ1, ЗТ1, СТ2, ЗТ2 — сток и затвор первого и второго активных транзисторов; ЗТН — затвор транзистора нагрузочного первого каскада; ПДО — плавающая диффузионная область

том) и алюминиевой перемычки соединена с затвором активного транзистора $ЗТ1$. Плавающая диффузионная область является также областью истока транзистора сброса (транзистор — восстановитель потенциала), затвор которого $ЗТС$ соединяет ПДО с находящимся под опорным напряжением стоком $СТС$ при подаче управляющего импульса. Рассмотрим подробнее работу узла считывания, используя для этого тактовую и потенциальную диаграммы, изображенные на рис. 3.12, б—з. На последний электрод ПЗС-регистра и затвор транзистора сброса подаются импульсы в *одинаковой фазе*. В упрощенном варианте на затвор транзистора сброса могут быть поданы импульсы той фазы, которой заканчивается регистр (фаза $\Phi 2$ на рис. 3.12, б). Лучше на затвор транзистора сброса подавать отдельный импульс, начинающийся раньше, чем импульс $\Phi 2$, и заканчивающийся также немного раньше

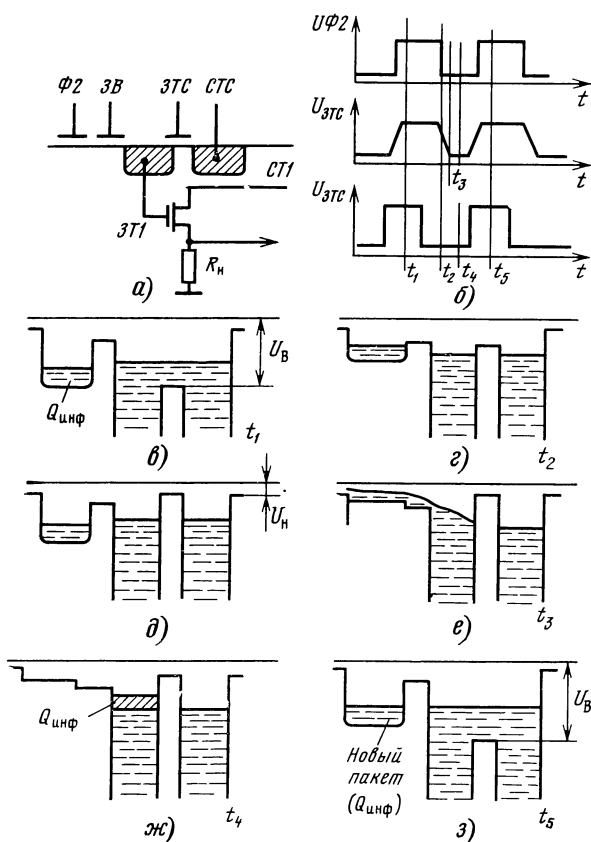


Рис. 3.12. Работа однокаскадного выходного устройства с плавающей диффузионной областью:

а — конструктивная схема ($\Phi 2$ — электрод второй фазы, $ЗВ$ — выходной затвор $ЗТС$, $СТС$, $ЗТ1$, $СТ1$ — затвор и сток транзистора сброса и активного транзистора); *б* — тактовые диаграммы для управления $ЗТС$ фазовыми импульсами и специальными укороченными импульсами (нижняя диаграмма); *в* — *з* — потенциальные диаграммы для разных моментов

импульса Φ_2 . Если же используется общий импульс, последний фазовый электрод выполняют шире (см. рис. 3.12,а, в) затвора транзистора сброса. На выходной затвор $3B$, разделяющий последний электрод, и затвор транзистора сброса подают постоянное смещение такой величины, чтобы уровень полностью заполненной потенциальной ямы под последним электродом при поданном импульсе Φ_2 был ниже потенциального барьера, а дно ямы при выключении Φ_2 оказалось выше потенциального барьера под выходным затвором (рис. 3.12,в,е). В момент t_1 на электрод Φ_2 и затвор $ЗТС$ подан высокий уровень смещения, под Φ_2 образовалась потенциальная яма (на рис. 3.12,в в нее уже поступил очередной зарядовый пакет $Q_{\text{инф}}$), а под затвором $ЗТС$ — канал с высокой проводимостью, соединивший ПДО с опорным напряжением стока транзистора сброса $СТС$. По окончании импульса в какой-то момент t_2 напряжение на его спаде будет таким, что канал под $ЗТС$ перекроется, ПДО отсоединится от $СТС$ и останется под плавающей потенциалом, равным опорному напряжению на $СТС$ (рис. 3.12,г). Дно потенциальной ямы под электродом Φ_2 также поднимается, но из-за большей (чем у затвора $ЗТС$) ширины электрода Φ_2 верхний уровень заполненной зарядом части ямы будет ниже потенциального барьера под выходным затвором. Если для управления затвором $ЗТС$ используется укороченный или сдвинутый импульс (см. нижнюю тактовую диаграмму рис. 3.12,б), то ситуация упрощается: затвор $ЗТС$ в момент t_2 полностью закрыт, а дно ямы под Φ_2 еще не начало подниматься, как показано на рис. 3.12,д. В момент t_3 , зафиксированный непосредственно после окончания импульса Φ_2 , дно потенциальной ямы под последним электродом поднялось до максимальной высоты и заряд беспрепятственно переливается в плавающую диффузионную область (см. рис. 3.12,е). Поскольку потенциал в этой области — плавающий, то он изменится на $\Delta U = Q_{\text{инф}}/C_{yc}$ (рис. 3.12,ж) в момент t_4 , характеризующий установившееся состояние. Наконец, в момент t_5 смещение высокого уровня снова подано на Φ_2 и $ЗТС$, потенциальная диаграмма приобретает исходный вид (см. рис. 3.12,в) — в потенциальную яму под последним электродом пришел следующий зарядовый пакет, а потенциал плавающей диффузионной области, вновь соединенной с $СТС$, вернулся к опорному значению. Если до момента начала нового импульса зарядовый пакет не успел полностью перейти в плавающую диффузионную область, часть информации потеряется.

Функционирование узла считывания во многом определяется режимом работы транзистора сброса, который, во-первых, должен успевать полностью удалять отработанный заряд из плавающей диффузионной области в сток транзистора стока и далее во внешнюю цепь, а во-вторых, вносить минимум тактовых помех в выходной сигнал. Неполное удаление заряда приводит к ухудшению частотно-контрастной характеристики и увеличению шумов ФПЗС. Быстродействие транзистора сброса зависит от того, работает он в крутой или пологой области характеристик. Если напряжение

на стоке транзистора сброса превышает (в начальный момент времени) разность $U_z - U_{\text{пор}}$, где $U_{\text{пор}}$ — пороговое напряжение, транзистор работает в пологой области. Переходный процесс, как отмечается в [2.7], протекает аналогично самоиндуцированному дрейфу заряда в ПЗС и его длительность $t_{\text{пол}}$ описывается выражением

$$t_{\text{пол}} = t_0 (Q_{\text{инф}}/Q(t) - 1), \quad (3.9)$$

где $t_0 = C_{y.c}^2 / \beta Q_{\text{инф}}$; β — удельная крутизна транзистора сброса; $C_{y.c}$ — эквивалентная емкость узла считывания; $Q(t)$ — заряд, остающийся в момент t . При работе в крутой области характеристик, когда $(U_z - U_{\text{пор}}) > U_c$, длительность переходного процесса $t_{\text{кр}}$ определяется выражением, описывающим процесс заряда емкости через резистор:

$$t_{\text{кр}} = \tau \ln [Q(t)/Q_{\text{инф}}], \quad (3.10)$$

где $\tau = C_{y.c} / 2\beta [U_z - U_{\text{пор}} - U_n(1 + \eta)]$; U_n — напряжение на истоке транзистора сброса; $\eta = C_{o.c}/C_d$; $C_{o.c}$ — емкость обедненного слоя под затвором.

Оценка длительности переходных процессов [27] для этих двух режимов при значениях $Q_{\text{инф}} = 0,09$ пКл; $Q(t)/Q_{\text{инф}} \leq 0,1$; $C_{y.c} = 0,3$ пФ; $U_z - U_{\text{пор}} - U_n(1 + \eta) = 1,5$ В; $\beta = 10$ мкА/В² показывает, что в первом случае время, необходимое для сброса заряда, равно 1 мкс, а во втором — 25 нс. Очевидно, что для обеспечения быстрого действия транзистор сброса должен работать в крутой области характеристик, т. е. амплитуду импульса, прикладываемого к затвору транзистора сброса, приходится выбирать большой, а это означает увеличение тактовой наводки. Затвор транзистора сброса всегда перекрывает ПДО, и емкость перекрытия $C_{з-и}$ образует с эквивалентной емкостью узла считывания $C_{y.c}$ делитель, причем чем меньше емкость узла считывания, тем больше наводка. Соотношение емкостей в типовых конструкциях узлов считывания $C_{з-и} : C_{y.c} = 10 : 1$, т. е. при $U_z \approx 10$ В к выходному сигналу присоединится когерентная наводка до 1 В. Единственно эффективным путем улучшения ситуации является снижение емкости перекрытия, так как емкость узла считывания стремятся сделать минимальной. Отметим, что при снижении $C_{y.c}$ уменьшается различие между длительностью переходного процесса в пологой и крутой областях (поскольку емкость $C_{y.c}$ входит в (3.9) в квадрате, а в (3.10) в первой степени). При $C_{y.c} = 0,03$ пФ, например, $t_{\text{кр}} = 2,3$ нс, а $t_{\text{пол}} = 10$ нс, т. е. можно допустить работу и в пологой области характеристик, избавясь при этом от недостатка, свойственного работе в крутой области, — *шума разбрызгивания*, который связан с неопределенностью движения заряда в канале транзистора сброса при его выключении [9].

Изменение потенциала ПДО, вызванное приходом зарядового пакета, передается на выход ФПЗС. Типовые значения емкостной нагрузки на выходе (емкость контактной площадки — на кристалле и вывода корпуса, входная емкость внешнего предусилителя

ля) составляют 15...20 пФ. Для согласования столь большой емкости с малой емкостью узла считывания используют МОП-транзисторы, включенные по схеме истокового повторителя с нагрузкой в виде резистора или МОП-транзистора; простейший вариант повторителя на одном транзисторе 3Т1 с резистивной нагрузкой приведен на рис. 3.12,а. Истоковый повторитель передает на выход изменения напряжения на входе, ослабленные в K раз, где K — коэффициент передачи повторителя. Соответственно емкость затвор — исток уменьшается в $(1-K)$ раз, и эквивалентная входная емкость повторителя равна $C_{вх} = C_{з-с} + (1+K)C_{з-и}$ (емкость затвор — сток $C_{з-с}$ находится под постоянным смещением и в перезарядке не участвует). Физическое объяснение эффекта заключается в том, что перезарядка емкости происходит из-за разности напряжений между входом и выходом повторителя, равной $(1-K)$. Если принять $K=1$, то напряжение на выходе будет точно отслеживать напряжение на входе; разность напряжений при этом отсутствует, и перезарядка емкости $C_{з-и}$ не происходит, что означает нулевую входную емкость. Реально $K < 1$, но его можно сделать достаточно близким к единице, обеспечив режим генератора тока по выходу (большая нагрузка). Входная эквивалентная емкость при больших значениях коэффициента передачи становится весьма малой — именно этой причиной объясняется применение в выходных устройствах ПЗС исключительно повторителей, а не усилителей по напряжению (инверторов). В [27] приведено сравнение повторителя и инвертора, оптимизированных по размерам с целью получения максимума отношения коэффициента передачи заряда к постоянной времени перезарядки емкости нагрузки $\tau_n = C_n S^{-1}$, где C_n — емкость нагрузки; S — крутизна транзистора в рабочей точке. Показано, что у повторителя удельная крутизна больше в $(1+\eta^{-1})$ раз (η — коэффициент влияния подложки), крутизна в рабочей точке больше в $(1+\eta^{-1})^{1/2}$ раз, а постоянная времени меньше в $[\eta(1+\eta)]^{-1/2}$ раз, чем у инвертора.

При использовании простейшего однокаскадного повторителя возникает противоречие: с одной стороны, для повышения быстродействия надо увеличивать удельную крутизну, т. е. ширину канала; с другой — для увеличения перепада напряжения на ПДО ширину канала следует уменьшать, так как $\Delta U = Q_{инф}/C_{у.с} = Q_{инф}/\{C_{доп} + [C_{з-с} + (1+K)C_{з-и}]\}$, где сумма емкостей в квадратной скобке прямо пропорциональна ширине канала. Таким образом, выходное устройство с однокаскадным повторителем может обеспечить работу на высоких частотах лишь при снижении амплитуды выходного сигнала. Достичь одновременно высокого быстродействия и достаточно большого выходного сигнала удастся, вводя дополнительный каскад (или несколько каскадов) усиления по току, т. е. сформировав на кристалле двухкаскадный истоковый повторитель. Топология двухкаскадного повторителя приведена на рис. 3.11, а его схема с паразитными емкостями — рис. 3.13. В двухкаскадном повторителе общий коэффициент передачи уменьшается (он равен произведению коэффициентов передачи каска-

находится в состоянии насыщения, и ток не зависит от напряжения на стоке, а определяется разностью ($U_3 - U_n$). Уменьшив, например, напряжение на затворе, можно, уменьшив на такую же величину U_n , получить то же значение тока, а это и означает, сдвиг характеристики. Строго говоря, из-за влияния подложки и отличного от нуля наклона стоковых характеристик в пологой области сдвиг меньше, чем изменение напряжения на затворе.

Пересечение характеристики нагрузочного транзистора $I_n(U_n)$ с характеристикой активного транзистора для выбранного напряжения на затворе дает рабочую точку повторителя. По графику рис. 3.14 легко определить коэффициент передачи повторителя. Напряжение на затворе является входным; если оно изменилось на $U_{32} - U_{31} = 1$ В, рабочая точка переместится из положения 1 в положение 2. Изменение напряжения на истоке, являющегося выходным напряжением повторителя, численно равно коэффициенту передачи. Из рисунка видно, что увеличение наклона нагрузочной кривой приведет к уменьшению коэффициента передачи. Максимальный коэффициент передачи достигается, если нагрузочный транзистор работает в режиме идеального генератора тока. По графикам рис. 3.14 удобно проследить процесс изменения напряжения $U_n - U_{\text{вых}}$ на выходе истокового повторителя, нагруженного на емкость следующего каскада. В стационарном состоянии ток через активный транзистор I_{a1} при некотором значении напряжения на затворе U_{31} и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ равен току через нагрузочный транзистор $I_{n1}(U_{\text{вых}1})$; состоянию схемы соответствует при этом точка 1. В какой-то момент напряжение на затворе $VT1$ изменяется скачком из-за появления заряда в ПДО, например, уменьшается до значения U_{32} . Напряжение на выходной емкости $VT1$ не может измениться скачком, на выходе поэтому останется прежнее значение $U_{\text{вых}2} = U_{\text{вых}1}$; состояние схемы описывается точкой 2. В этом состоянии равенство токов $I_{a1} = I_{n1}$ нарушается, емкость $C_{\text{вых}}$ начинает разряжаться. Процесс разряда описывается уравнением $C_{\text{вых}} = (dU_{\text{вых}}/dt) (I_a - I_n)$. Рабочая точка перемещается по направлению к стационарному положению 3. Предположим, что точка 3 не достигнута из-за того, что в какой-то момент, когда выходное напряжение приняло значение $U_{\text{вых}4}$, напряжение на затворе $VT1$ вновь скачкообразно изменялось до исходной величины U_{31} ; это произошло в результате открывания транзистора сброса и восстановления потенциала ПДО до опорного. Рабочая точка скачком перебросится из точки 4 на характеристике, соответствующей U_{32} , в точку 5 на характеристике, соответствующей U_{31} . Емкость $C_{\text{вых}}$ начнет постепенно заряжаться до более высокого потенциала, а рабочая точка — перемещаться по направлению к стационарному положению (точка 1). Заштрихованная площадь (рис. 3.14) может служить косвенным показателем быстроты действия схемы — чем больше площадь, тем меньше перезарядка — и использоваться для оценки влияния параметров транзисторов и рабочих режимов. Увеличение наклона нагрузочной кривой так же, как и увеличение крутизны активного тран-

зистора, приводит к повышению быстродействия. Попадание рабочей точки на нелинейный участок характеристики активного транзистора вызывает снижение быстродействия по сравнению с работой на линейном участке с высокой крутизной. Время перезарядки повторителя может быть записано в предположении линейной зависимости токов I_a и I_n от напряжений (что справедливо при небольших отклонениях от стационарной рабочей точки 3) следующим образом [28]: $t = C_{\text{вых}} \ln[(U_{\text{вых}2} - U_{\text{вых}3}) / (U_{\text{вых}4} - U_{\text{вых}3})] / (\beta_a + \beta_n)$. Сняв экспериментально характеристики рис. 3.14, легко определить графическим путем рабочую точку, коэффициент передачи и быстродействие схемы. Как правило, длина канала активного транзистора первого каскада выбирается минимальной, насколько позволяет уровень технологии. В тестовом транзисторе необязательно задавать столь короткий канал, что облегчает его изготовление и измерение. По характеристикам тестового транзистора с помощью умножения на масштабный коэффициент находят характеристики активного транзистора.

Если транзистор первого каскада $VT1$ выполняется с минимальными размерами, то для транзистора второго каскада $VT2$ существует оптимальная ширина канала, при которой обеспечивается наибольшее быстродействие. Действительно, при большой ширине канала $VT2$ емкость нагрузки первого каскада будет большой, и быстродействие $VT1$ снизится; при малой ширине канала транзистор $VT2$ не будет успевать перезаряжать емкость на выходе ПЗС. В [28] для определения оптимума принято в качестве допущения, что время перезаряда двухкаскадного повторителя равно сумме времен перезаряда каждого из каскадов и проводимость нагрузочных транзисторов равна нулю $t = t_1 + t_2$; $t_1 = C_1 \ln(\alpha^{-1}) / g_1$; $t_2 = C_2 \ln(\alpha^{-1}) / g_2$, где α — некоторый уровень напряжения на емкости, до которого она успевает перезарядиться (достаточно принять $\alpha = 0,99$ от полного перепада); g_1 , g_2 и C_1 , C_2 — проводимости транзисторов $VT1$ и $VT2$ при управлении по истоку и емкости нагрузки первого и второго каскадов ($C_2 = C_{\text{вых}}$, выходная емкость ПЗС). Емкость C_1 складывается из входной емкости транзистора $VT2$ и паразитной емкости, вносимой элементами подсоединения C_p . Входная емкость $C_{\text{вх}2} = C_{3-\text{н}} + (1 - K) C_{3-\text{и}}$. Для $C_{3-\text{и}}$ можно записать согласно [29]: $C_{3-\text{и}} = C_{\text{пер}} + 0,7 C_d W_2 L_2 = W_2 d_{\text{пер}} C_d + 0,7 C_d W_2 L_2$, где $C_{\text{пер}}$ — емкость перекрытия затвором области истока; W , L — ширина и длина канала; $d_{\text{пер}}$ — длина перекрытия; C_d — емкость подзатворного диэлектрика. Если длины перекрытия затвором истока и стока равны, то

$$C_{\text{вх}2} = W_2 [C_d d_{\text{пер}} + (1 - K) (d_{\text{пер}} C_d + 0,7 C_d L_2)] = W_2 a. \quad (3.11)$$

В свою очередь, проводимость $g_2 = \partial I_c / \partial U_d = W_2 b$, a и b — постоянные коэффициенты и определяются по графикам рис. 3.14. Подставив g_2 и $C_{\text{вх}2}$ в (3.11), находим производную dt/dW_2 и, приравняв ее нулю, определяем оптимальную ширину канала транзистора второго каскада: $W_{2\text{opt}} = \sqrt{C_{\text{вых}} g_1 / ab}$.

В [30] определена зависимость выходного сигнала от ширины канала (и крутизны) выходного транзистора для одно- и двух-каскадного повторителя при фиксированном быстродействии (в узле считывания использован плавающий затвор). Результаты этой работы показывают, что выбор ширины канала становится менее критичным, если напряжение на затворе активного транзистора достаточно велико (в пределе равно напряжению на стоке). Такое условие приводит, однако, к увеличению наводки от транзистора сброса, так как напряжение на затворе $VT1$ практически равно напряжению стока транзистора сброса, а, поскольку он должен работать в крутой области характеристики, где $(U_z - U_{пор}) > U_c$, амплитуду импульса, подаваемого на затвор транзистора сброса, приходится увеличивать, в результате чего возрастают и наводки.

Снижение емкости узла считывания выступает при проектировании в качестве одной из основных задач. Представляет поэтому интерес конкретный анализ топологии узла считывания, выявление наиболее существенных компонентов емкости и проектирование на базе такого анализа выходных устройств с улучшенными параметрами. В качестве примера рассмотрим типовое выходное устройство, использованное, например, в ФПЗС типа К1200ЦЛ5, ЦЛ6. Отметим те особенности топологии (см. рис. 3.11), которые следует учесть при анализе: области истоков, стоков и ПДО выполнены с самосовмещением, когда маской от примеси служит поликремниевый затвор или полевой оксид; под полевым оксидом расположен слой p^+ -типа, соприкасающийся с ПДО, истоками и стоками; соединение ПДО с затвором активного транзистора осуществлено с помощью алюминиевой перемычки, расположенной для снижения емкости на полевым оксиде (см. поперечное сечение на рис. 3.11).

Подробная эквивалентная схема устройства приведена на рис. 3.13. На ней указаны паразитные емкости, учитываемые при анализе устройства и расчете эквивалентной емкости узла считывания.

Напряжения на выходном затворе и стоке транзистора $VT1$ постоянны, поэтому емкости $C_{пер1}$ и $C_{з-с}$ просто добавляются к емкости ПДО и перемычки при расчете перепада выходного сигнала. Транзистор сброса в момент появления зарядового пакета в ПДО закрыт, на его затворе установлен постоянный уровень напряжения, и емкость $C_{пер2}$ можно добавить к полученной сумме емкостей.

Выражение для эквивалентной емкости узла считывания может быть записано в виде $C_{у.с} = C_{пер1} + C_{з-с} + C_{пер2} + C_{ПДО} + C_{п} + (1-K)C_{з-и}$.

Определяя емкость ПДО, следует обратить внимание на то, что ПДО формируется самосовмещением и, следовательно, граничит с областью p^+ -типа, расположенной под полевым оксидом (см. рис. 3.11). Образующийся по границе ПДО с полевым оксидом

резкий p - n -переход обладает удельной емкостью (на единицу площади), намного большей, чем удельная емкость плоской части ПДО, поскольку концентрация примеси в области p^+ -типа много выше, чем в подложке. Распределение примеси в p^+ -области на границе полевого оксида подробно исследовано в [31]. Воспользовавшись результатами этой работы, получим, что удельная емкость (на единицу длины) границы ПДО — полевого оксид составляет примерно $2 \cdot 10^{-12}$ Ф·см⁻¹. Это означает, что для принятой за типовую топологии выходного устройства с ПДО основной вклад в $C_{\text{ПДО}}$ вносит именно граница ПДО — полевого оксид, а не площадь ПДО. Емкость плоской части ПДО оказывается в несколько раз меньше емкости границы (для рис. 3.11, например, $C_{\text{ПДО}} = C_{\text{плоск}} + C_{\text{границ}} = 0,003 + 0,0096 = 0,0126$ пФ).

Таким образом, целесообразно не стремиться всячески уменьшать площадь ПДО путем ужесточения технологических норм, а обратить внимание на способы снижения емкости между ПДО и полевым оксидом. Кардинальным образом снизить граничную емкость можно, если отодвинуть границу ПДО от полевого оксида, т. е. не пользоваться самосовмещением для формирования истоков, стоков и ПДО, а применить дополнительную операцию фотолитографии для создания маски от вводимой ионным легированием примеси. Этим достигается еще один дополнительный эффект — значительно увеличиваются напряжения пробоя ПДО и стоков (истоки обычно находятся под небольшим напряжением), т. е. растет надежность ФПЗС. При нежелании или невозможности отказаться от самосовмещения можно рекомендовать снижение в допустимых пределах концентрации примеси в p^+ -области.

Заметный вклад в суммарную емкость вносит соединительная перемычка между ПДО и затвором транзистора $VT1$, расположенная над полевым оксидом толщиной около 1 мкм. Удельная емкость такого оксида составляет $3 \cdot 10^{-9}$ Ф·см⁻². Между тем емкость обедненного слоя ПДО, заряжаемая при отсутствии сигнала до 15...20 В, не превышает $1 \cdot 10^{-9}$ Ф·см⁻² (концентрация примеси в подложке $3 \cdot 10^{14}$ см⁻³), т. е. она в 3 раза меньше емкости полевого оксида. Отсюда следует, что перемычку целесообразно располагать не над полевым оксидом, а над обедненным слоем, естественно, при условии, что ширина этого слоя достаточно велика. Это условие выполняется, когда перемычку размещают над каналом МДП-структуры, причем канал (объемный или поверхностный) должен быть связан зарядовой связью с ПДО. В первом случае канал заполнен носителями, поскольку напряжение на затворе равно напряжению на истоке и потенциал в канале равен потенциалу ПДО. Удельная емкость затвор — подложка в такой ситуации равна удельной емкости канал — подложка, т. е. практически не отличается от удельной емкости перехода ПДО — подложка. Во втором случае поверхностный канал под затвором полностью обеднен (считается, что пороговое напряжение транзистора $VT1$ положительно), так как все носители стекают в ПДО, закороченную с затвором. Удельная емкость затвор — подложка

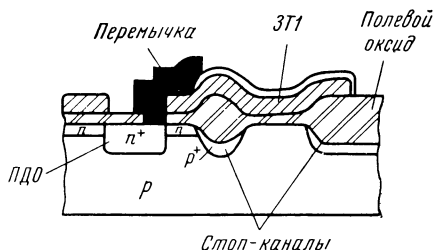


Рис. 3.15. Сечение модифицированного узла считывания заряда в выходном устройстве с плавающей диффузионной областью (см. на рис. 3.11)

равна удельной емкости подзатворного диэлектрика и обедненного слоя полупроводника и близка к $1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} \cdot \text{см}^{-2}$.

Топология узла считывания, спроектированного с учетом выдвинутых принципов, показана на рис. 3.15. Топология имеет еще одну особенность: при создании перемычки, соединяющей ПДО с поликремниевым затвором транзистора *VT1*, используется одно контактное окно (в типовом узле два окна, см. рис. 3.11), общее для ПДО и затвора. Это позволяет уменьшать площадь перемычки, так как при типовой структуре между краями контактного окна и поликремниевого затвора необходимо оставлять зазор 3...5 мкм, а в данном случае этот зазор можно исключить.

В результате емкость узла считывания удается снизить до 0,03 пФ. Для сравнения, укажем, емкость типового узла считывания ФПЗС К1200 ЦЛ5, К1200 ЦЛ6 составляет примерно 0,05 пФ.

3.3. Технология

Прогресс разработок ФПЗС, как, впрочем, и любых сложных полупроводниковых приборов или интегральных микросхем, всецело зависит от уровня развития технологии. Физические идеи, заложенные в ПЗС, немногочисленны и мало изменились со времени изобретения ФПЗС. Напротив, технологические приемы меняются быстро количественно и качественно. Движущей силой развития технологии является тенденция к достижению в рамках определенных физических идей все лучших свойств приборов.

Для первых лет существования ПЗС характерно обилие полурекламных заявлений о том, что технология ПЗС много проще, нежели технология любых других БИС, и в частности МОП-БИС, наиболее близких к ПЗС. Действительно, в ПЗС не надо создавать большого количества *p-n*-переходов и контактов к ним; из-за этого технологический процесс видоизменяется и достигается высокая степень интеграции. Однако считать технологию ПЗС простой было бы ошибкой, в первую очередь по той причине, что информация в ПЗС представлена очень малым количеством зарядов. Любые внутренние дефекты кремния, границы кремний — диэлектрик, внешние воздействия, такие, как нагрев и радиация, становятся для ПЗС опасными, так как порождают заряды, не несущие полезной информации. Особенно остро влияние дефектов сказывается в ФПЗС, имеющих большие активные площади. Для того

чтобы конкурировать с видиконами по разрешающей способности, ФПЗС должны обладать размерами, близкими к размерам мишеней видиконов, т. е. около $1 \times 1 \text{ см}^2$.

Рост площади кристалла приводит к тому, что в технологии ФПЗС одну из главенствующих ролей начинает играть качество фотолитографии. Наглядно иллюстрирует этот график рис. 3.16, связывающий плотность дефектов D , площадь кристалла A_k и количество годных структур Π после шести последовательных операций фотолитографии. При расчете использовалось выражение (11), приведенное в [1].

Приняв практически очень низкую плотность дефектов (1 см^{-2}), найдем, что для обычных БИС, площадь которых не превышает $0,1 \text{ см}^2$, выход годных после шести фотолитографий составит вполне приемлемую величину $P \approx 30\%$; для ФПЗС с площадью $1 \dots 2 \text{ см}^2$ этот выход будет близок к одной сотой процента. Здесь учтены только дефекты фотолитографии, без добавления дефектов полупроводника, диэлектрика и т. д.

Большие площади кристаллов и высокая поражаемость дефектами вызывают фактически перестройку всего технологического комплекса и даже, если можно так выразиться, перестройку «психологии» разработки. Дело в том, что при столь низкой вероятности получить годную структуру, даже этап научно-исследовательских работ приходится вести в условиях, приближенных к массовому производству, — при максимальной чистоте, больших запасах пластин, высокой степени автоматизации.

Оперирование в ПЗС с малыми информационными зарядами выдвигает серьезные требования к качеству границы полупроводника — диэлектрик, т. е. не менее критическую роль, чем фотолитография, начинают играть процессы подготовки поверхности полупроводника и окисления. Типичные плотности поверхностных состояний, вполне допустимые в МОП БИС, равны $10^{11} \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Для успешной работы ПЗС с поверхностным каналом необходимы

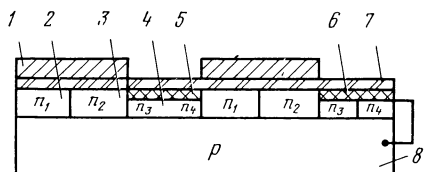
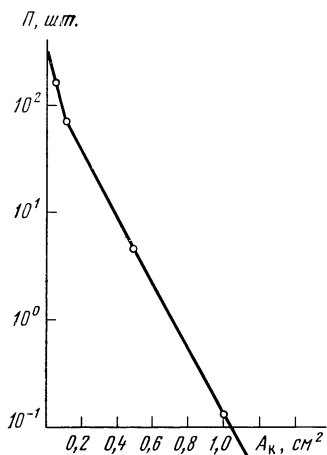


Рис. 3.17. Структура ПЗС с виртуальной фазой



Рис. 3.16. Количество годных кристаллов на пластине диаметром 7,5 см в зависимости от площади кристалла

плотности поверхностных состояний $10^{10} \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$, причем эту плотность следует поддерживать равномерно на большой площади кристалла. Низкая плотность поверхностных состояний нужна также и для обеспечения эффективного переноса зарядовых пакетов в ПЗС с объемным каналом. В любом варианте многократный процесс переноса, не встречающийся в МОП-БИС, усложняет технологию ПЗС и требует более высокого уровня по сравнению с технологией МОП-БИС.

Можно сказать, что технология ПЗС — это доведенная до совершенства технология МОП-БИС, требующая минимума дефектов как в исходном полупроводнике, так и возникающих при технологических обработках, обеспечивающая высокое качество процессов фотолитографии, окисления и ионного легирования, нуждающаяся в максимально чистой производственной среде.

В настоящее время существует более десятка видов технологических последовательностей изготовления ПЗС. Выделим два основных типа — *однослойную* и *многослойную* технологии.

Однослойная технология. В простейшем варианте электроды ПЗС формируются за один процесс и лежат в одном слое разделенные зазорами, столь малыми, чтобы между электродами был возможен эффективный перенос носителей. После окисления кремниевой подложки наносят слой металла, например молибдена или вольфрама, и затем вытравливают зазоры шириною $2 \dots 3 \text{ мкм}$. Однако уже для небольших ФПЗС, скажем, матриц с числом элементов около 10^4 , общая длина разделяющих электроды зазоров достигает $1,2 \text{ м}$ и на всем протяжении недопустима ни одна закоротка (если представить, что зазор вырос до ширины железнодорожной колеи, то длины этой дороги хватило бы на путешествие из Москвы в Ленинград и обратно). В ПЗС, изготовленных по такой однослойной технологии, рядом находятся электроды разных фаз, и закоротка между электродами приводит к выходу из строя всего прибора. Кроме того, получение зазора в $2 \dots 3 \text{ мкм}$ близко к пределу возможностей практической фотолитографии, а распределение потенциала в зазоре зависит от окружающей среды.

Для создания крупных матриц более подходит видоизмененная однослойная технология, по которой на оксидированную кремниевую подложку наносят слой поликремния, и области, соответствующие электродам, легируют, оставляя зазоры между ними нелегированными. Зазоры в этом случае могут быть увеличены до $5 \dots 6 \text{ мкм}$, так как объемный заряд получившихся *p-n*-переходов распространяется в зазор. Сопротивление нелегированных областей необходимо поддерживать очень точно — при слишком большом сопротивлении потенциал в зазорах не будет задаваться тактовым напряжением (подаваемым на легированные области), а при слишком малом — возрастет рассеиваемая мощность.

Более перспективной оказалась *технология ПЗС с виртуальной фазой*, которую также можно отнести к однослойной без зазора [32]. Структура ПЗС с виртуальной фазой показана на рис. 3.17. Электроды 1, вытравленные в слое поликремния, располагаются

поверх оксида 7 над парами областей, отличающимися концентрацией примеси: тактируемой областью потенциального барьера 2 и тактируемой областью хранения 3. Между электродами сформированы аналогичные пары неактивируемых виртуальных областей — барьерная 4 и хранения 5. Виртуальные пары «накрыты» сильнолегированной областью p^+ -типа 6, соединенной с подложкой 8; при тактировании электродов поверхностный потенциал виртуальной фазы остается неизменным.

При создании ПЗС с виртуальной фазой подложки p -типа легируются однородно примесью n -типа, в результате чего образуется объемный n -канал (область 2). Потенциальная яма в тактируемой фазе образуется дополнительной имплантацией с небольшой энергией доноров в область хранения 3. Имплантация с более высокой энергией осуществляется в область 5, где образуется виртуальный барьер, и с такой же повышенной энергией и еще большей дозой — в область 4. Для фиксации поверхностного потенциала в область виртуальной фазы проводится дополнительная имплантация акцепторов, благодаря чему и становятся возможными работы прибора в однофазном режиме.

В конкретном технологическом примере [33] исходным материалом служил p -кремний с концентрацией акцепторов 10^{15} см^{-2} . В приповерхностной области формируют объемный n -канал, а также p^+ -стоп-каналы и входные и выходные диффузионные области. Затем путем термического окисления выращивают затворный оксид толщиной 0,1 мкм. На поверхность оксида наносят фоторезистивную маску, и в открытые участки оксида имплантируют донорную примесь — мышьяк, фосфор или сурьму для последующей диффузии из оксида в подложку (рис. 3.18,а). Фоторезист снимают и наносят слой легированного поликремния, причем фотолитографию по нему выполняют таким образом, чтобы образующиеся поликремниевые электроды были сдвинуты относительно легированной области в оксиде (рис. 3.18,б). Незащищенный поликремнием подзатворный оксид удаляют (рис. 3.18,в) и подвергают структуру новому оксидированию с одновременным образованием оксида и на поликремниевом электроде. Далее наносят фоторезистивную маску (рис. 3.18,г) и выполняют имплантацию доноров в открытые участки подзатворного оксида. Фоторезист удаляют и вновь производят имплантацию донорной примеси сквозь оксид непосредственно в область канала в подложке. Далее структура подвергается термообработке для активации примеси и диффузии донорной примеси, находившейся после ионной имплантации в оксиде. Наконец, производится формирование виртуального электрода путем ионной имплантации акцепторной примеси в подложку сквозь оксид в участки, не занятые поликремниевыми электродами (рис. 3.18,д).

Таким образом, формирование необходимого распределения потенциала в ячейке ПЗС с виртуальной фазой осуществляется четырьмя операциями ионной имплантации примесей, причем дозы

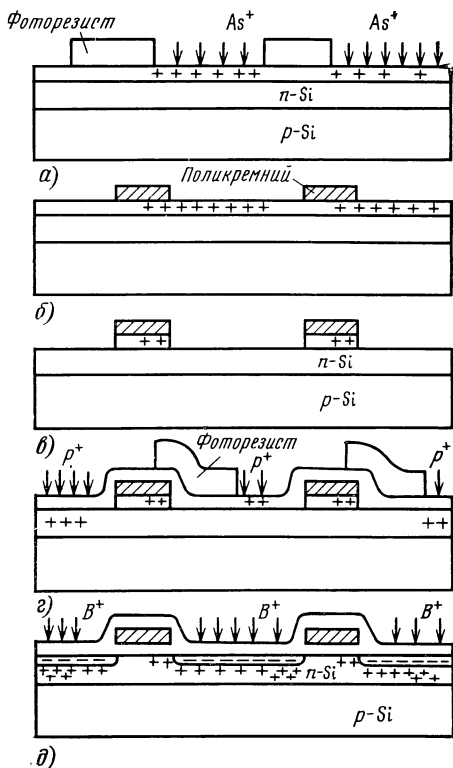


Рис. 3.18. Технология структуры ПЗС с виртуальной фазой.

а — формирование общего слоя n -типа и локальное легирование оксида мышьяком; *б* — формирование поликремниевых электродов со сдвигом по отношению к легированным мышьяком областям; *в* — удаление оксида между электродами с последующим окислением (не показано); *г* — локальное легирование фосфором оксида; *д* — заключительная стадия после повторного легирования фосфором и легирования бором (+ обозначает донор, — акцептор)

отличаются мало и, следовательно, должны выдерживаться с высокой точностью. В [33] приведены конкретные данные ионного легирования: мышьяк, энергия 80 кэВ, доза $1,3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (1 мкКл/см²); фосфор, энергия 180 кэВ, доза 10^{12} см^{-2} (0,16 мкКл/см²); фосфор, энергия 180 кэВ, доза $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (0,32 мкКл/см²); бор, энергия 30 кэВ, доза $1,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (около 1 мкКл/см²). В ФПЗС с виртуальной фазой практически не опасны дефекты фотолитографии. Закоротки между поликремниевыми электродами вызовут только небольшое изменение

чувствительности в области виртуальной фазы, понятие «межфазного короткого замыкания» теряет смысл. Технология приборов с виртуальной фазой достаточно заманчива с точки зрения увеличения выхода годных, однако она сложна, требует прецизионного ионного легирования и, может быть по этой причине, еще не завоевала признания.

Многослойная технология. Наиболее широко используется технология, в которой электроды, выполненные в разных слоях поликремния, перекрываются друг с другом. Разделяющие их зазоры уменьшаются при этом до толщины изолирующего межфазного оксида, т. е. до 0,1 ... 0,2 мкм, так что эффективность переноса перестает зависеть от величины зазора. Многослойная технология довольно четко делится на два подвида: *двухслойную*, при которой в одном слое поликремния формируют электроды разных фаз, и *трехслойную*, при которой в каждом слое или, по крайней мере, в двух слоях поликремния формируют электроды одной и той же фазы. На рис. 3.19,а показано, как по двухслойной технологии изготавливают двух- и четырехфазные ПЗС. Аналогично можно создать и трехфазный ПЗС (рис. 3.19,б), но логичнее для трехфазных структур использовать *трехслойную технологию*. В этом случае ценю удлинения технологического маршрута резко уменьшают брак из-за межфазных коротких замыканий, поскольку в каждом слое

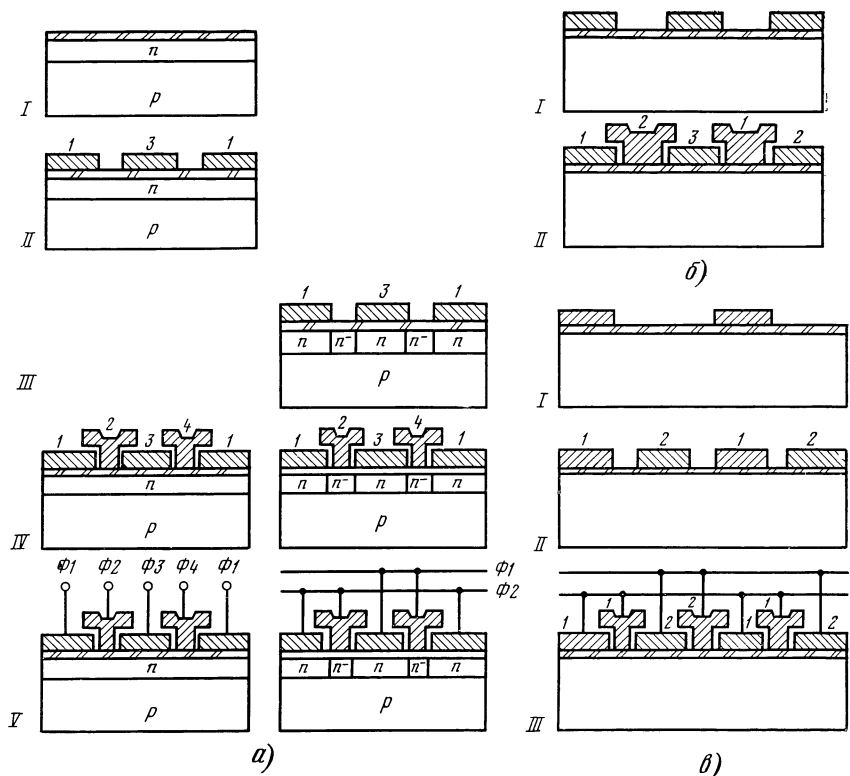


Рис. 3.19. Схемы изготовления ПЗС по многослойной технологии:

а — по двухслойной технологии четырех- и двухфазного (справа) ПЗС с объемным каналом, I — формирование объемного канала, II — травление в первом слое поликремния электродов нечетных фаз, III — имплантация в межэлектродные зазоры для образования потенциальных барьеров, IV — травление во втором слое поликремния электродов четырех фаз, V — готовые структуры, *б* — по двухслойной технологии трехфазного ПЗС с поверхностным каналом; I — травление в первом слое поликремния электродов всех трех фаз, II — травление во втором слое, *в* — по трехслойной технологии двухфазного ПЗС; I — травление в первом слое поликремния электродов «своей» (первой) фазы, II — травление во втором слое электродов второй фазы, III — травление в третьем слое электродов сразу двух фаз

лежат электроды «своей» фазы. Применение трехслойной технологии позволяет уменьшить вероятность межфазных коротких замыканий и в двухфазных ПЗС. В таких структурах два слоя содержат электроды одной и той же фазы (первой и третьей на рис. 3.19, *в*), а в третьем слое формируют электроды двух разных фаз. Трехслойная технология позволяет также вдвое (по сравнению с двухслойной) уменьшить число контактных окон к фазовым электродам двух- и четырехфазных ПЗС или плотность расположения контактных окон. Этим обстоятельством объясняется то, что современные линейные двухфазные ФПЗС с большим числом элементов (до 5000) выполняют по трехслойному варианту [9].

Рассмотрим процесс создания по трехслойной технологии трехфазного матричного ФПЗС с переносом кадра. Такой ФПЗС с

поверхностным каналом является типичным представителем приборов первого поколения. Процесс логично разделить на блоки, т. е. группы операций, внутренне связанных друг с другом. Между блоками удобно вводить контрольные операции. Структуры, прошедшие блок операций, можно при необходимости хранить определенное время.

1. Блок операций «подложка» включает исходную обработку кремниевых пластин, окисление, фотолитографию стоп-каналов и ионное легирование стоп-каналов. Кремниевые пластины предварительно проходят 100%-ную отбраковку по качеству обработки поверхности. Критерием служит отсутствие царапин и полос после механической обработки. Любое нарушение поверхности вызывает появление дефектов на телевизионном изображении. Затем пластины обрабатывают в кипящем перекисно-аммиачном растворе и отмывают в деионизованной воде с сопротивлением не ниже 18 МОм. После сушки на центрифуге пластины окисляют в потоке кислорода с добавкой хлористого водорода. Толщина исходного оксида обычно составляет 0,2...0,3 мкм (рис. 3.20,а). Режимы исходного окисления заметно влияют на плотность дефектов.

Фотолитография стоп-каналов является одной из критичных, так как на этой стадии требуется обеспечить наименьшие размеры и отсутствие дефектов, в особенности вызывающих смыкание соседних стоп-каналов. Чем меньший размер (ширину) стоп-канала удастся получить с помощью имеющихся в распоряжении фотолитографического оборудования, фотошаблонов и резиста, тем лучше, так как тем меньше неиспользуемая площадь ФПЗС. Типовой размер стоп-каналов составляет 2...3 мкм. Фоторезист на этой фотолитографии не удаляют, а используют в качестве маски при ионном легировании. Оксид в местах будущих стоп-каналов желательно не стравливать для лучшего сохранения поверхности. Только в том случае, когда не хватает энергии для проникновения ионов примеси сквозь весь слой оксида, его подтравливают или удаляют полностью. Для создания стоп-каналов *n*-типа используют мышьяк, обычная доза 30 мкКл при энергии 30 кэВ. Для каналов *p*-типа вынужденно применяют быстродиффундирующий бор (20 мкКл, 30 кэВ).

Отжиг после ионного легирования не делают, так как его заменяют последующие термообработки. После удаления резиста подложки со стоп-каналами (см. рис. 3.20,б) могут храниться долгое время, поскольку они надежно защищены исходным оксидом.

2. Блок «электроды» занимает большую часть времени цикла, так как содержит повторяющуюся 3 раза группу операций: окисление — нанесение и легирование поликремния — фотолитография поликремниевых электродов.

Подложки со стоп-каналами поступают на операцию удаления исходного оксида и отмывки, аналогичной описанной, после чего их окисляют в кислороде с добавкой хлористого водорода. Полученный подзатворный оксид (0,1...0,12 мкм) выполняет наиболее

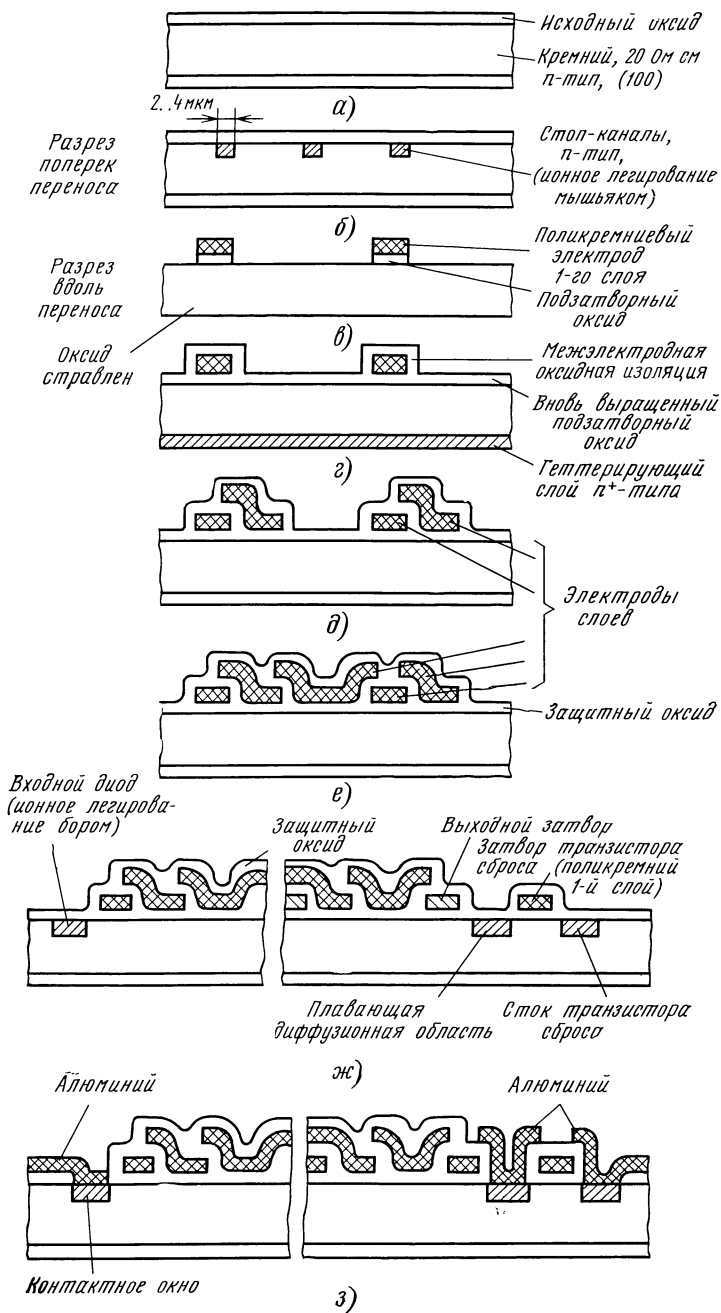


Рис. 3.20. Типовая схема технологического процесса изготовления трехслойного поликремниевого ФПЗС

ответственную функцию в ФПЗС. Режимы его получения будут рассмотрены далее отдельно. На тонкий оксид наносят методом пиролиза моносилана слой поликремния толщиной 0,4...0,5 мкм, в котором затем с помощью фотолитографии будут вытравлены электроды первого слоя. Поликремниевые электроды должны иметь высокую электрическую проводимость, и слой поликремния следует легировать до максимально возможного уровня. Легирование в процессе выращивания поликремния, проводимого при низких температурах 650...700°C, не позволяет получить максимально низкое поверхностное сопротивление слоя. Поэтому применяют специальную операцию легирования при температурах порядка 1000...1050°C. В качестве легирующей примеси целесообразно использовать фосфор, дающий низкое поверхностное сопротивление и являющийся хорошим геттером. Для того чтобы обеспечить эффективное геттерирование, после нанесения слоя поликремния удаляют оксид с обратной стороны подложки и только затем осуществляют операцию легирования — геттерирования. После фотолитографии электроды первого слоя имеют вид, показанный на рис. 3.20,в. Расстояние между электродами равно удвоенной ширине электрода (для того, чтобы поместить электроды второго и третьего слоев), подзатворный оксид между электродами вытравлен до кремния. Затем подложку снова окисляют таким образом, чтобы между электродами вырос оксид той же толщины, что и под ними. Сами электроды тоже покрываются слоем оксида, служащего межэлектродной изоляцией (см. рис. 3.20,г). На оксид наносят второй слой поликремния, проводят легирование — геттерирование и фотолитографию электродов второго слоя. При фотолитографии оксид между электродами первого и второго слоев вновь вытравливают до кремния и снова наращивают до первоначальной толщины, обеспечивая при этом оксидную изоляцию электродов второго слоя (см. рис. 3.20,д). Наконец, группу операций нанесения, легирования и геттерирования повторяют в третий раз, и подложка со стоп-каналами и электродами всех трех фаз готова (см. рис. 3.20,е). Заключительной операцией блока является защитное окисление третьего слоя поликремния. Поскольку слои оксида и поликремния закрывают всю поверхность, пластины со структурами могут храниться длительное время.

3. Блок операций «*p-n*-переходы» на первый взгляд несложен, но именно на данной стадии технолог должен быть особо внимателен. Брак в этом блоке встречается часто и исправить его трудно: например, весьма критична операция вытравливания контактных окон. В блок входят две фотолитографии, ионное легирование и финишное геттерирование.

Фотолитографию областей под диоды (входные), стоки и истоки МОП-транзисторов, плавающие диффузионные области проводят, не вскрывая оксид (см. рис. 3.20,ж). Маской при ионном легировании служит фоторезист. Дозу и энергию ионов выбирают такими, чтобы обеспечить требуемую крутизну МОП-транзисторов с учетом последующего финишного геттерирования, при котором

одновременно отжигаются имплантированные области. Самосовмещением создают МОП-транзисторы, затворы их могут быть вытравлены в любом из слоев поликремния. После ионного легирования удаляют резист и оксид с обратной стороны, отмывают и проводят финишное геттерирование. На поверхности защитного оксида при этом возникает пассивирующая пленка фосфорно-силикатного стекла. Однако из-за этой пленки стекла при фотолитографии контактных окон (рис. 3.20,з) легко возникают растравливания. После фотолитографии контактных окон обязателен контроль полноты удаления оксида.

4. Блок «контакты» включает напыление алюминия; фотолитографию контактных площадок и соединений по алюминию; вжигание алюминия при 450°C в водороде. Главная опасность на этой стадии заключается в обрыве алюминиевых дорожек на ступеньках поликремния и оксида. Такие обрывы зачастую трудно или невозможно проконтролировать под микроскопом (можно это сделать с помощью электронного сканирующего микроскопа), они проявляются при измерениях параметров ФПЗС. Если измерения параметров осуществить на пластине, то брак еще можно исправить, повторив операции блока заново. При этом контроль на пластине одних статических параметров оказывается недостаточным. Под статическими параметрами понимают вольт-амперные характеристики электродов, диодов и МОП-транзисторов. Обрыв алюминиевой дорожки, ведущей к диоду или МОП-транзистору, безошибочно определяется по отсутствию вольт-амперных характеристик. У фазовых электродов, входных и выходных затворов проверяют отсутствие утечек и коротких замыканий на подложку. Здесь обрыв дорожки будет регистрироваться как бесконечно большое сопротивление, которое легко принять за хорошее качество изоляции между электродами и подложкой. Избавиться от подобной ошибки можно, измеряя одновременно с сопротивлением и емкость между электродами и подложкой. Радикальным решением является измерение непосредственно на пластине динамических параметров, т. е. контроль функционирования ФПЗС. Для этого к зондам присоединяют генератор тактовых импульсов и выходной предусилитель; видеосигнал подают на телевизионный монитор и по наличию изображения судят о годности структуры.

Рассмотренная технологическая схема хотя и содержит основные операции создания ФПЗС, но не позволяет изготавливать ФПЗС второго поколения, отличающиеся высокой эффективностью переноса, быстроедействием, простотой управления [34]. Для обеспечения таких качеств необходимо: сформировать объемный канал, однородный или со встроенными областями потенциальных барьеров; создать локально полевой оксид, снижающий паразитные емкости; повысить качество геттерирования — операции, определяющей важнейшие параметры ФПЗС.

Переход от поверхностного к объемному каналу выдвигает на одно из первых мест в технологическом маршруте операцию прецизионного ионного легирования. Дозы, используемые для формиро-

вания объемного канала, весьма малы и составляют 0,1 ... 0,2 мкКл. Еще меньшие дозы 0,04 ... 0,08 мкКл используются для создания областей потенциальных барьеров в объемном канале. Такие малые количества ионов трудно задать с высокой точностью, особенно если учесть, что неоднородность дозы по пластине, диаметр которой достигает 100 мм, не должна превышать 2 ... 3%. Объемный канал обычно стремятся формировать после того, как выращен подзатворный оксид, поскольку лучше сохраняется профиль распределения концентрации примеси в канале. Это требует высоких энергий ионов (500 ... 700 кэВ). Глубина объемного канала, как правило, лежит в пределах 0,2 ... 0,6 мкм. При больших глубинах снижается удельная зарядовая емкость, поэтому приходится снижать температуру термообработок, следующих за операцией ионного легирования. В технологии ФПЗС с поверхностным каналом подзатворный и межфазный оксид выращивались одновременно при высокой температуре 1150 ... 1200 °С, поскольку, чем выше температура окисления, тем меньше плотность поверхностных состояний, меньше проколов, выше диэлектрическая прочность. Технология ФПЗС с объемным каналом требует разделения процессов подзатворного и межфазного окисления с тем, чтобы межфазный оксид, формируемый после того, как создан канал, можно было получать при сравнительно невысоких температурах 850 ... 950 °С. Разделение позволяет осуществлять двуслойная подзатворная система, образуемая слоем термического оксида 50 ... 100 нм с нанесенным поверх него слоем нитрида кремния 50 ... 70 нм. Нитрид кремния при 850 ... 1000 °С почти не окисляется и не подвержен действию травителей для диоксида кремния и поликремния. Использование нитрида кремния позволяет окислять поликремниевые электроды в любом режиме (желательно не выше 1000 °С), задавая нужную толщину межфазного оксида, так как под следующим слоем поликремния толщина подзатворной системы практически не изменится. Улучшается при этом и качество границы между подзатворным оксидом и кремнием. В приборах, изготовленных по *безнитридной технологии*, когда приходилось каждый раз вытравливать и заново выращивать подзатворный оксид, наблюдались скопления дефектов вдоль областей оставшегося и вновь выращенного оксидов. Пониженная в сравнении с поверхностным каналом удельная зарядовая емкость объемного канала требует уменьшения плотности генерационно-рекомбинационных центров, подавления различного рода неоднородностей в кремнии и на границе раздела. По этой причине приходится усиливать геттерирование (удовлетворявшее технологию ФПЗС с поверхностным каналом): создавать внутренний геттер в исходных пластинах кремния, оптимизировать режимы финишного геттерирования.

С учетом особенностей, вызванных переходом к объемному каналу, рассмотрим технологическую схему изготовления ФПЗС второго поколения.

Блок «подложка» (1). Включает исходную обработку и создание геттера, локальное выращивание полевого оксида

(ЛОКОС), формирование стоп-каналов и антиблуминговых стоков. Гораздо большее внимание уделяется качеству механической обработки кремниевых пластин. В [35] перечислены дефекты, контролируемые на рабочей стороне поверхности пластины: загрязнения; трещины и линии длиной более 0,25 мм; краевые сколы длиной более 0,25 мм; канавки, бугорки (размером более 0,25 мм); шероховатая поверхность; царапины, имеющие отношение длины к ширине более 5 : 1; помутнения. На пластине диаметром 100 мм допускается не более трех царапин общей длиной до 25 мм. Тщательно отмытые, проконтролированные по внешнему виду пластины поступают на операцию формирования геттера (исходное геттерирование). В современной технологии ПЗС геттерирование становится одним из важнейших процессов, определяющим такие параметры, как темновой ток и его неоднородность, шумы, пороговую чувствительность. Под геттерированием понимают процедуру создания в объеме или на поверхности кремния областей с высокой плотностью нарушений кристаллической решетки — стоки, в которые при термообработке «стекают» из активных областей быстро-диффундирующие примеси. В рассмотренной схеме изготовления ФПЗС с поверхностным каналом использован внешний геттер — нарушенный слой, образованный на обратной стороне пластины в результате диффузии примеси (фосфора) при легировании поликремния. Технология ФПЗС с объемным каналом требует введения дополнительной операции исходного геттерирования и улучшения финишного геттерирования. Исходное геттерирование может сводиться к формированию внутреннего или внешнего геттера либо двух геттеров одновременно. Внутреннее геттерирование основано на принципе образования непосредственно у поверхности раздела диэлектрик — кремний бездефектной зоны глубиной 10 ... 60 мкм. Ниже (глубже) бездефектной зоны располагается область стока (ею может служить вся оставшаяся часть подложки) с высокой концентрацией кристаллографических дефектов. Наиболее разработан процесс создания кислородного геттера, состоящий из трех этапов термообработки:

образования бездефектной зоны у рабочей поверхности путем нагрева при высокой температуре 1050 ... 1200 °С в течение нескольких часов в среде инертного газа с небольшой добавкой кислорода для устранения эрозии пластин. Бездефектная зона характеризуется низкой концентрацией атомов кислорода и связанных с кислородом дефектов;

формирования кислородных преципитатов в объеме кремния (за исключением бездефектной зоны) выдержкой в течение нескольких часов при 650 ... 800 °С в инертной или окислительной среде. На этом этапе межзельный кислород высаждается на дислокациях и других дефектах кристаллической решетки, образуя преципитаты типа диоксида кремния. Такие оксидные преципитаты могут сливаться в более крупные формирования — кластеры;

геттерирования быстро-диффундирующих примесей в результате осаждения их в местах возникновения оксидных преципитатов, ко-

торые вызывают большие механические напряжения кристаллической решетки. В этих местах свободная энергия выше, чем в регулярной решетке, быстродиффундирующим примесям энергетически выгодно здесь высидеться. Подсчитано [36], что один преципитат может удерживать 160...180 атомов примеси.

Геттерирование происходит в процессе технологических термообработок, при 900...1250 °С. Общая длительность термообработок, при которых описанный геттер действует, лежит в пределах 5...20 ч. Для формирования хорошего оксидного геттера важно знать концентрацию кислорода в кремнии. При низких концентрациях ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$... $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) можно обойтись без первого этапа создания бездефектной зоны, однако геттерирующая способность оксидных кластеров будет недостаточной. Высокие концентрации кислорода (выше $2,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) затрудняют процесс образования бездефектной зоны. Чтобы сформировать зону глубиной 25 мкм за 4 ч при концентрации $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, требуется 1100 °С, а при концентрации $3,6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ температура возрастает до 1200 °С [37]. Зачастую в литературе приводятся режимы создания оксидного геттера без первого этапа. Это удобно с точки зрения сокращения длительности процесса, снижения нежелательных дефектов, связанных с высокотемпературной обработкой (загрязнение и коробление пластины), но требует точного контроля концентрации кислорода и учета конкретных технологических режимов. Так, при температурах технологических обработок ниже 975 °С оксидный геттер практически не функционирует при любых исходных концентрациях кислорода, если бездефектная зона не была предварительно сформирована. Хорошие результаты дает объединение внутреннего и внешнего геттеров. Внешний геттер, как правило, создают на обратной стороне пластины механической обработкой, ионным легированием, лазерным облучением, нанесением слоев, отличающихся по свойствам от кремния и из-за этого деформирующих решетку в приповерхностном слое (нитрид кремния, поликремний). Процесс внесения нарушений механической обработкой невоспроизводим, нарушения могут отжигаться при высоких температурах (более 1150 °С). Кроме того, механически обработанная обратная поверхность служит источником загрязнений, так как активно адсорбирует примеси в ходе технологических обработок. Ионное легирование воспроизводимо и дает хорошие результаты, но требует длительного времени для набора нужной дозы (около 1000 мкКл). Внесенные нарушения также отжигаются. Достаточно чистыми и удобными методами создания внешнего геттера можно считать обработку обратной поверхности лазерным пучком и нанесение слоев нитрида кремния и поликремния. В [37] приведены результаты, достигнутые сочетанием оксидного геттера с обработкой неодимовым лазером при плотности энергии в пучке 30 Дж/см². С лазерной обработкой концентрация оксидных кластеров была на 2 порядка выше, чем без нее, несмотря на сравнительно низкую исходную концентрацию кислорода. В [37] рекомендуют в технологии ПЗС, которая выдвигает наиболее жесткие требования

к геттерированию, использовать кремний, выращенный методом Чохральского в осевом магнитном поле, характеризующийся невысоким содержанием кислорода (около $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), и сочетать оксидный геттер с лазерной обработкой или нанесением поликремниевых слоев. Правильно осуществленное геттерирование обеспечивает увеличение эффективного времени жизни носителей на три порядка. Подробнее с вопросами геттерирования читатель может ознакомиться в [38—40].

Локальное окисление проводят стандартным способом. Окисляют кремний, на оксид осаждают слой нитрида кремния 100 нм, затем создают маску из фоторезиста, и в плазме удаляют нитрид и оксид в тех местах, где должен быть выращен полевой оксид (на периферии кристалла и в стоп-канальных областях), если речь идет о линейных ФПЗС. В матричных ФПЗС стоп-канальные области в активной части прибора создают отдельным процессом фотолитографии и ионного легирования. После удаления нитрида и оксида проводят ионное легирование примесью того же типа, что и в подложке с концентрацией около 10^{16} см^{-3} . Толщина полевого оксида составляет 0,8...1,1 мкм. Для выращивания оксида такой толщины желательно использовать окисление под давлением. Локальное окисление чревато неприятностями: по периметру раздела полевого и подзатворного оксидов плотность генерационно-рекомбинационных центров примерно на порядок выше, чем вдали от периметра или в отсутствие полевого оксида [31]. Именно по этой причине в матричных ФПЗС избегают использовать полевой оксид для стоп-каналов внутри активной части прибора. После выращивания полевого оксида ненужные маскирующие слои нитрида кремния и оксида удаляют. Нитрид стравливают в горячей ортофосфорной кислоте, оксид — в буферном травителе на основе фтористоводородной кислоты. Возможен вариант, при котором вначале создают стоп-канальные области, а затем удаляют маску. В этом случае лучше предохраняется поверхность подложки. На рис.

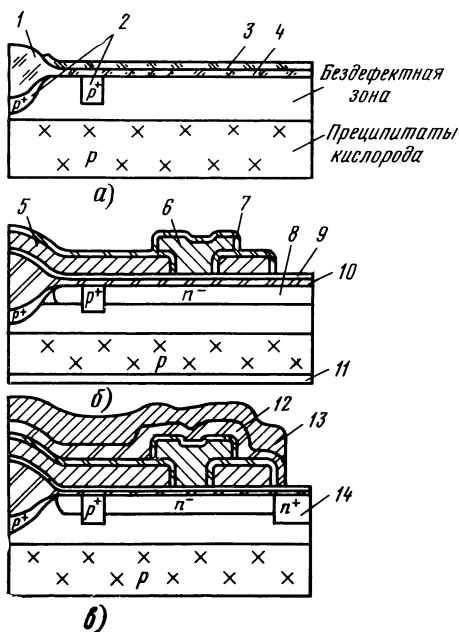


Рис. 3.21. Технологическая схема изготовления двухфазного ФПЗС второго поколения

а — подложка с внутренним геттером, полевым оксидом (1), стоп-канальными областями (2) и маской из оксида (3) и нитрида кремния (4), б — структура с электродами первого (5) и второго (6) слоев, разделенными межфазным оксидом (7), с объемным каналом (8), подзатворной системой оксид (10) — нитрид кремния (9), в — готовая структура со слоем диэлектрика (12), светозащитным экраном (13) и фотодиодом (14) (слой n^+ типа (11) с тыльной стороны удален)

3.21,а показан разрез подложки с внутренним геттером, локально выращенным полевым оксидом, и созданными затем стоп-канальными областями. Завершает блок 1 операция формирования стоков антиблуминга — узких p - n -переходов, отделяющих стоп-канальные области от каналов переноса. В блок 1 входят два термических окисления, осаждение нитрида кремния, три фотолитографии и три операции ионного легирования. Иногда с целью уменьшения влияния термообработки формирование стоп-каналов и антиблуминговых стоков выполняют в следующем блоке после создания подзатворной системы.

Блок «электроды» (2). Блок начинается с создания подзатворной системы оксид — нитрид кремния. Окислению предшествует тщательная отмывка с применением горячих смесей серной и соляной (азотной) кислот или серной кислоты с перекисью водорода. Само окисление желательно выполнять с применением пирогенного метода (сжигание кислорода и водорода непосредственно в трубе печи). Обязателен контроль на пластинах — спутниках вольт-фарадных характеристик, плотности дефектов и толщины оксида. Осаждение слоя нитрида кремния должно производиться не позже чем через 30 мин после окисления. Затем формируют объемный канал ионным легированием мышьяком (n -канал) или бором (p -канал). Ионное легирование производят в открытую. Если же требуется в фотоячейке или в выходном устройстве оставить участки с поверхностным каналом, то вводят дополнительную фотолитографию. Осаждение и легирование поликремния, фотолитография по поликремнию в принципе не отличаются от описанных для ФПЗС с поверхностным каналом, если речь идет о равномерно легированном объемном канале. При необходимости создать встроенные потенциальные барьеры после формирования первого слоя электродов проводят ионное легирование (например, бором в случае n -канала) для частичной компенсации примеси в межэлектродных промежутках, а затем формируют второй слой электродов. Особого внимания в блоке 2 требуют операции межфазного окисления, определяющие во многом выход годных ФПЗС. Скорость окисления поликремния отличается от скорости окисления монокристаллического кремния и связана с зернистостью поликремния, степенью легирования, температурой и характером (сухое или влажное, с добавлением хлоридов или без) окисления. Оксид на поликремний растет очень быстро на начальной стадии окисления, после чего процесс замедляется и приближается к окислению монокристаллического кремния, когда кинетика окисления определяется диффузией окислителя к поверхности кремния. В табл. 3.2 приведены соотношения толщин слоев оксида, выращенного на моно- и поликремнии при разных степенях легирования, температуре и среде окисления. Из табл. 3.2 следует, что наибольшие отличия в окислении поликремния по сравнению с монокристаллическим слаболегированным кремнием, из которого обычно изготавливают пластины-спутники, наблюдаются при сильном легировании фосфором, низкой температуре и влажной среде окисления,

**Зависимость толщины оксида на поликремнии от режимов окисления
и степени легирования**

Температура окисления, °С	Окислительная среда	Соотношение толщины				
		n^- - поли n^- - моно	n^+ - поли n^- - моно	n^+ - поли n^- - моно	n^+ - поли n^- - моно	n^+ - поли n^+ - моно
850	Влажная	1,30	4,85	3,27	2,52	0,67
950	—»—	1,35	2,99	2,56	1,90	0,86
950	Сухая	1,07	1,6	1,37	1,65	1,10
1100	—»—	1,08	1,14	1,22	1,13	1,07

т. е. как раз при тех условиях, которые на практике используются в производстве современных ФПЗС. Влияние легирования объясняется тем, что концентрация вакансий как в кремнии, так и в поликремнии при легировании резко растет из-за разрыва связей между атомами кремния и в результате уменьшения энергии активации процесса взаимодействия окислителя с кремнием.

При окислении на поверхности поликремния возникают дефекты в виде выступов, высота которых доходит до половины толщины оксида. Такие выступы иногда называют протуберанцами. Возможен отрыв протуберанца с образованием окруженного оксидом включения кремния. Возникновение выступов объясняется различной скоростью окисления разных кристаллографических плоскостей и развивающимися в результате этого механическими напряжениями, которые «выталкивают» кусочки поликремния в оксид. На шероховатостях, выпуклостях, выступах и включениях происходит локальное снижение диэлектрической прочности, приводящее к утечкам и межфазным короткам.

Ситуация резко ухудшается, если слой поликремния не плоский, а рельефный, т. е. после фотолитографии электродов. Напомним, что при окислении из одного объема кремния образуется примерно 2,27 объемов диоксида кремния; для поликремния это соотношение примерно сохраняется. Если поверхность кремния или поликремния плоская, возникающие при таком увеличении объема механические напряжения однородны и направлены нормально к поверхности. В случае рельефного кремния (поликремния) на гранях рельефа возникают боковые составляющие, в результате появляются области растяжения на внешних углах и сжатия на внутренних углах. Кроме того, на внешних углах рельефа толщина оксида может быть меньше, чем на плоскости. В результате этих двух причин на внешних углах возможно образование утечек и коротких замыканий, исследованное в [41]. В этой же работе показано, что при окислении участки поликремния на углах рельефа могут скользить по границам зерен, дополнительно снижая целостность оксида. Очевидно, наилучшей формой поликремниевоего рельефа будет закругленная внешняя грань; отмечалось [42], что плазменное анизотропное травление поликремния, дающее верти-

кальные стенки, отрицательно влияет на электрические характеристики приборов с многослойными системами поликремний — оксид.

Легирование поликремния фосфором позволяет осуществлять промежуточное геттерирование: на обратной стороне пластины, свободной от оксида, создается слой n^+ -типа, являющийся стоком для быстродиффундирующих примесей. На рис. 3.21,б показана структура ФПЗС после 2-го блока операций. В блок 2 входят три или четыре (для трехслойной технологии) ответственные операции окисления, одна или две операции прецизионного легирования, две или три операции осаждения и легирования поликремния, три или четыре фотолитографии.

Блок « p - n -переходы» (3). В этом блоке к перечисленным добавляются операции создания p - n -переходов в фотодиодных ячейках и финишного геттерирования. Фотодиоды (в матрицах со строчно-кадровым переносом, линейных ФПЗС) получают ионным легированием небольшой дозой 0,5...1 мкКл без маскирования. Истоки и стоки транзисторов, охранные диоды и плавающие диффузионные области формируют ионным легированием либо диффузией примеси. Фотолитография контактных окон, как правило, проводится дважды с нанесением промежуточного слоя пиролитического оксида. Тем не менее проколы, возникающие при травлении окон, и неполное вскрытие окон остаются серьезными составляющими брака приборов. Исключительно большую роль играет финишное геттерирование. Обычно его осуществляют термообработкой в парах фосфорсодержащих соединений с образованием на обратной, свободной от оксида, поверхности пластины мощного слоя n^+ -типа. Фосфор образует с быстродиффундирующими примесями — золотом и медью — комплексы, из-за чего увеличивается растворимость этих примесей в n^+ -слое (по сравнению с нелегированным кремнием). Коэффициент сегрегации примесей между легированным и нелегированным кремнием резко растет с увеличением концентрации фосфора и понижением температуры.

Финишное геттерирование обычно проводят в два этапа. На первом этапе диффузии фосфора задают достаточно высокую температуру и плотность паров фосфора в реакторе, чтобы глубина n^+ -слоя и концентрация атомов фосфора в нем были максимальными. Второй этап (сегрегационный отжиг) проводят при более низкой температуре, медленно охлаждая пластины кремния. После диффузии фосфора при 920 °С и сегрегационного отжига (в течение 4 ч при 620 °С) времена релаксации лежат в пределах 100 ... 200 с [43]. После финишного геттерирования нагрев до температур выше температуры геттерирования исключается, поскольку он может привести к загрязнению примесями, диффундирующими из n^+ -слоя. В блок 3 входят одна или две операции ионного легирования, три фотолитографии, осаждение пиролитического оксида, одна или две диффузии фосфора (имеется в виду подложка p -типа).

Блок «контакты» (4). Гораздо меньше, чем чистый алюминий, взаимодействует с оксидом сплав алюминия с 1 ... 1,5%

кремния. По этой причине для создания разводки и контактных площадок в современных ФПЗС используют напыление сплава (толщина 1...1,1 мкм). При необходимости экранировки нерабочих областей ФПЗС от излучения в блок 4 вводят дополнительные операции: после фотолитографии контактов и вжигания осаждают защитный слой пиролитического оксида и поверх него напыляют слой алюминия или алюминия с кремнием. Экран не подвергают вжиганию в водороде, чтобы снизить вероятность коротких замыканий с нижележащей контактной металлизацией. В связи с тем, что ФПЗС с объемным каналом, как правило, изготавливают на *p*-кремнии (в отличие от ФПЗС первого поколения), возникает проблема надежного контакта к обратной стороне пластины. Возникающий при геттерировании n^+ -слой образует *p-n*-переход с подложкой. Протекающие в подложке токи перезарядки фазовых электродов могут смещать отдельные участки *p-n*-перехода в прямом направлении, вызывая инжекцию носителей в подложку [44]. Для устранения паразитной инжекции приходится монтировать кристаллы в корпус с применением эвтектики золота с какой-либо акцепторной примесью или удалять n^+ -слой травлением, напылять на обратную сторону слой алюминия и вжигать его. В блок 4 входят две фотолитографии, пиролитическое осаждение оксида, две операции напыления алюминия и сплавов алюминия, одна или две операции вжигания в восстановительной среде. На рис. 3.21,в показана в разрезе структура ФПЗС с фотодиодными ячейками и экраном. В простейшем варианте маршрут создания современного ФПЗС с объемным каналом включает около 50 крупных операций, в том числе двенадцать фотолитографий, семь операций ионного легирования, шесть термического окисления, семь пиролитического осаждения.

Любая технология решает задачу компромиссного характера: как обеспечить получение, с одной стороны, требуемых параметров прибора, а с другой — достаточно высокого выхода годных приборов. Для того чтобы определить влияние дефектов на выход годных приборов, необходимо ввести само понятие «дефект», знать площадь, периметр или объем в приборе, чувствительные к тому или иному виду дефектов, и смоделировать вероятность поражения дефектами при известном или предполагаемом распределении дефектов. В ФПЗС брак по вольт-амперным характеристикам вызывается следующими причинами: короткими замыканиями между фазовыми электродами, а также между подложкой и электродами или *p-n*-переходами; разрывом поликремниевых электродов или алюминиевых дорожек; утечками диэлектрика или *p-n*-переходов. Короткие замыкания особенно между фазами встречаются наиболее часто и приводят практически всегда к выходу прибора из строя, так что можно с достаточно хорошим приближением оценивать технологию по одному типу дефектов, а именно вызывающих короткие замыкания в приборе. На рис. 3.22 показано схематически, как и в каких участках структуры ФПЗС возникают короткие замыкания: А — между неперекрывающимися электрода-

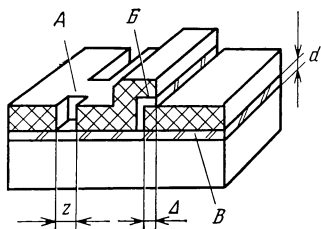


Рис. 3.22. Схема возникновения короткого замыкания в структуре ПЗС:

A — между неперекрывающимися электродами, разделенными зазором z , B — в местах перекрытия электродов на ширину Δ ; B — на подложку через диэлектрик толщиной d

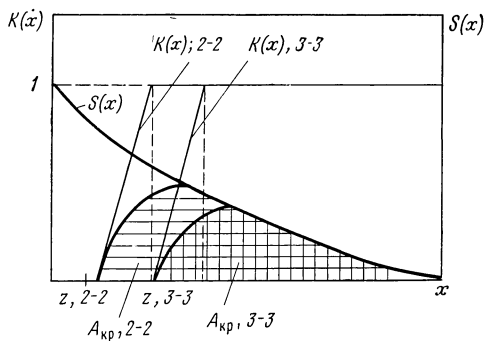


Рис. 3.23. Функции $K(x)$ вероятности поражения дефектом данного размера и типа (островок) для двух (2—2) и трехслойной (3—3) технологий, совмещенные с функцией $S(x)$ вероятности нахождения дефекта данного размера

ми вызываются невытравленными участками поликремния в зазоре с длиной, равной периметру, и с шириной z , связаны только с фотолитографией; B — между перекрывающимися электродами вызываются нарушениями в слое диэлектрика на участках перекрытия с длиной, равной периметру электродов, и с шириной Δ , связаны с фотолитографией и проколами в диэлектрике межфазной изоляции; B — между подложкой и электродами вызываются нарушениями в слое диэлектрика толщиной d под электродами с общей площадью A_3 ; связаны с фотолитографией и проколами в подзатворном диэлектрике. Зависимость выхода годных приборов P от проколов и других нарушений в слоях диэлектрика может быть выражена в виде $P = \exp(-\lambda A_{кр})$, где λ — плотность проколов; $A_{кр}$ — критическая площадь, при попадании на которую дефекта возникает короткое замыкание.

Предполагается, что вероятность поражения дефектами не зависит от того, сколько дефектов уже имеется на кристалле. Размеры дефектов также не учитываются, считается, что даже самый маленький прокол приводит к полному браку.

Сложнее обстоит дело с учетом фотолитографических дефектов, поскольку здесь нельзя пренебречь зависимостью вероятности поражения от размера дефекта. Если в первом случае критическая площадь равна площади электрода или перекрытия, то во втором критическая площадь может существенно отличаться от геометрической и быть больше или меньше ее в зависимости от вида распределения фотолитографических дефектов по размерам и геометрии структуры ПЗС: $A_{кр} = A_3 S(x) K(x)$, где $S(x)$ — распределение дефектов по размерам; $K(x)$ — функция вероятности поражения дефектом данного размера, попадающим на структуру с данной геометрией.

Для того чтобы получить распределение дефектов по плотности и размерам, прибегают к постоянному контролю структур после фотолитографий. Его осуществляют визуально, измеряя под микроскопом количество и размер дефекта (усредненный при неправильной форме), или с помощью специальных тестов, представляющих серпантин поликремниевых полос такой же ширины и с такими же зазорами, что и в приборе.

Определив параметры распределения по плотности — математическое ожидание \bar{x} и стандартное отклонение σ , можно найти выражение для выхода годных приборов, учитывающее фотолитографические дефекты [45]. $P = (1 + \lambda A_{\text{кр}}/\alpha)^{-\alpha}$, где $\alpha = \sigma^{-2}$, т. е. коэффициент α есть величина, обратно пропорциональная дисперсии распределения. Можно аппроксимировать степенными функциями распределение дефектов по размерам. В [46] предложено заменить кривую $S(x)$ двумя функциями: для размеров $0 \dots \bar{x}$ линейной функцией $S(x) = ax$ и для размеров $\bar{x} \dots x_m$ функцией $S(x) = bx^{-p}$, где a и b — константы, зависящие от геометрии прибора; p может принимать значения $1 \dots 3$ в зависимости от того, круто или полого спадает правая (после \bar{x}) ветвь кривой распределения; x_{max} — максимальный размер дефекта. Если кривая распределения спадает резко, т. е. нет крупных дефектов, то $p=3$, если же крупные дефекты встречаются в больших количествах, кривая аппроксимируется функцией с показателем $p=1$. В [47] рассмотрена типичная для ФПЗС структура из множества параллельных электродов шириною a_z и длиной L_z , разделенных зазором z , и определена критическая площадь в зависимости от вида распределения дефектов по размерам и геометрических размеров структуры a_z , L_z , z . Для случая $p=3$ критическая площадь примерно вдвое меньше геометрической $A_z = zL_z$; для $p=1$, наоборот, $A_{\text{кр}} \approx 5zL_z$, т. е. при существовании крупных дефектов наиболее точно отражает их влияние увеличение критической площади. Крупные дефекты характерны для контактной фотолитографии. Они также вызываются плохой фильтрацией фоторезиста и высокой загрязненностью производственных помещений. Функция $K(x)$ вероятности поражения дефектом (островками) данного размера показана на рис. 3.23: при $x < z$ функция $K(x) = 0$, т. е. дефекты размером меньше, чем ширина критического зазора, неопасны. При $x > z$ функция $K(x) > 0$ и, возрастая, достигает единицы при некотором x_1 . Дефекты размером больше, чем x_1 , приводят к браку со 100%-ной вероятностью. Для системы электродов шириной a_z и зазоров шириною z найдено, что $x_1 = a_z + 2z$ [46]. При $a_z = z$ дефекты с размерами более утроенной величины зазора становятся абсолютно опасными. На рис. 3.23 приведена также зависимость $S(x) \times K(x)$, заштрихованная область представляет произведение $S(x) \times K(x)$. Пользуясь рис. 3.23, можно сравнить двух- и трехслойную технологию по степени поражаемости такими фотолитографическими дефектами, как невытравленные участки поликремния в зазоре между электродами. Для двухфазного ФПЗС, изготовленного по двухслойной технологии, типичны

ширина электрода 7 мкм и зазор 3 мкм; для трехфазного ФПЗС, изготовленного по трехслойной технологии, при той же ширине электрода зазор равен 14 мкм. Сравнение заштрихованных областей (критические области $A_{кр}$ для обеих технологий) на рис. 3.23 показывает, насколько устойчивее к дефектам трехслойная технология. Добавим, что в трехслойном трехфазном ФПЗС в одном слое лежат электроды одной фазы, т. е. их замыкание дефектом вызовет не межфазное короткое замыкание, а локальное ухудшение переноса. Особенно надежна в этом плане технология ФПЗС с виртуальной фазой, в которой тактируемые электроды могут замыкаться друг с другом, а в предельном случае представляют один общий тактируемый электрод. Это означает, что дефекты рассматриваемого типа неопасны вообще или вызывают только локальное снижение чувствительности из-за поглощения света поликремнием дефекта. Сравнение различных технологий по степени чувствительности к проколам в местах перекрытия электродов показывает, что в трехслойных ФПЗС критическая площадь в 1,5 раза больше, чем в двухслойном; в ФПЗС с виртуальной фазой перекрытие отсутствует, и, следовательно, устранена зависимость от этого типа дефектов. Проколы в подзатворном диэлектрике в ФПЗС, изготовленных по двух- и трехслойной технологиям, одинаково опасны, но плотность их намного меньше плотности дефектов, приводящих к межфазным коротким замыканиям. Технология с виртуальной фазой вновь оказывается наилучшей, поскольку критическая площадь под электродами здесь в 2 раза меньше. Суммируя, можно считать, что наиболее устойчива к поражению дефектами технология ФПЗС с виртуальной фазой (за это достоинство приходится расплачиваться серьезным усложнением процесса ионного легирования). Влияние дефектов сильно зависит от типа ФПЗС.

Матрицы с КП имеют общую площадь больше, чем матрицы с СКП и ХУ-матрицы, из-за наличия дополнительной секции хранения. Площади матриц с СКП и ХУ-матриц почти одинаковы ($1/2 \dots 2/3$ площади матриц с КП), однако критическая по отношению к дефектам площадь, т. е. площадь, занимаемая электродами на тонком оксиде, у ХУ-матриц в 2 и 4 раза меньше, чем у матриц с СКП и КП.

Фотолитографические дефекты и дефекты диэлектрика влияют также на выход годных ФПЗС по параметрам.

На рис. 3.24,а изображена упрощенная матрица с кадровым переносом, содержащая 6×6 элементов в каждой секции, а также показан телевизионный экран, разбитый на 6×6 элементов разложения, соответствующих элементам матрицы. Следует помнить, что порядок следования строк в матрице и на экране противоположен: луч на экране рисует первой строку, сформированную из элементов последней, шестой строки матрицы.

Наиболее опасны дефекты фотолитографии, в первую очередь перемычки в стоп-каналах, приводящие к смыканию двух или нескольких стоп-каналов. Подобные перемычки вызовут появление на

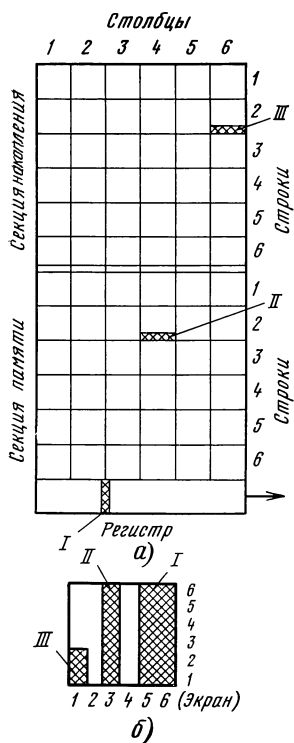


Рис. 3.24 Упрощенная матрица на 6×6 элементов (а), содержащая дефекты в виде перемычек (т. е. смыкания соседних стоп-каналов), и вызванные ими дефекты изображения на ТВ-экране (б)

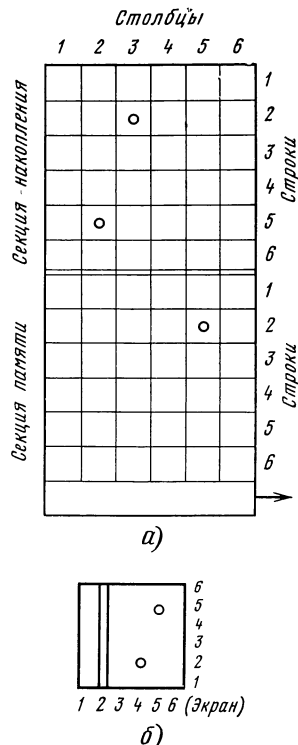


Рис. 3.25. Дефекты телевизионного изображения, связанные с центрами генерации — рекомбинации:
а — упрощенная матрица; б — телевизионный экран

телевизионном изображении темных полос или областей в зависимости от того, где находится перемычка. Перемычка стоп-канала в выходном регистре дает темную область; на рис. 3.24,б эта перемычка I расположена около второго столбца, и темная область I имеет ширину в два столбца (пятый и шестой на экране). Перемычка в секции памяти II вызывает появление вертикальной темной полосы II, тянущейся через весь экран, а перемычка в секции накопления III даст частичную темную полосу III, так как те зарядовые пакеты, которые накопились в элементах ниже перемычки, будут перенесены на выход и формируют изображение.

Дефекты фотолитографии поликремниевых электродов при трехфазной трехслойной структуре не столь опасны, как дефекты фотолитографии стоп-каналов, но могут серьезно влиять на качество изображения. Участки невытравленного между электродами поликремния приведут к локальному ухудшению переноса и некоторому смазыванию изображения, если они лежат в первом и во

втором слое; перемычки в третьем слое на перенос не влияют. Разрывы поликремниевых электродов в секциях накопления и памяти приводят к появлению темных точек, горизонтальных и вертикальных полос, даже если напряжение на электроды подается с двух сторон. Разрывы у основания Ш-образных электродов выходного регистра могут вызвать в зависимости от местоположения полное отсутствие изображения или частичное его затемнение. В двухфазных ФПЗС электроды попарно объединяются алюминиевой шиной, где плохая проработка контактных окон на операции фотолиграфии приводит к появлению темных полос и областей. К описанным дефектам ТВ-изображения добавляются дефекты, вызванные рекомбинационно-генерационными центрами в объеме кремния и на границе раздела кремний — диэлектрик, а также неоднородным характером легирования исходного кремния. Локальные участки с повышенным темпом генерации-рекомбинации дают на изображении светлые пятна или полосы в зависимости от места расположения. На рис. 3.25,а показан центр генерации-рекомбинации, расположенный в секции накопления (третий столбец, вторая строка), — соответственно на ТВ-изображении появится светлое пятно. Яркость пятна пропорциональна амплитуде импульса накопления и времени накопления. Попавшие в секцию памяти центры с высоким темпом генерации-рекомбинации могут вызвать появление светлых полос на изображении, яркость которых зависит от напряжения на электродах секции памяти, а длина — от местоположения дефекта (рис. 3.25,б).

Центрами повышенной генерации-рекомбинации, как показано многочисленными исследователями, являются преципитаты, дефекты упаковки, скопления дислокаций и другие нарушения кристаллической решетки. Соответствие, например, между дефектами упаковки и светлыми пятнами на изображении может быть установлено следующим образом. Фиксируют (фотографируют) положение светлых пятен на изображении, сформированном, например, матричным ФПЗС, затем стравливают контакты, электроды, оксид и обрабатывают обнажившуюся поверхность кремния в селективном травителе. Расположение выявленных дефектов упаковки сравнивают с расположением светлых пятен — совпадение с дефектами наблюдается в 70 ... 80% случаев.

Дефекты упаковки концентрируются в местах механических нарушений поверхности. Любая царапина, попавшая в область накопления, будет видна на экране в виде светлой полосы той же формы.

Генерационно-рекомбинационные центры в кремнии влияют на качество ТВ-изображения тремя возможными путями: уменьшают эффективное время жизни и тем самым чувствительность ФПЗС; скапливаясь в местах нарушений кристаллической решетки, приводят к появлению светлых полос и пятен на изображении; вызывают неоднородность в распределении темнового тока, наблюдаемую в виде смазанных пятен и полос неопределенной формы (эффект «грязного окна»). Природа возникновения такой неодно-

родности не совсем ясна. Возможно, она связана с неравномерным распределением кислорода [48]. Неравномерное распределение в кремнии легирующей примеси приведет к появлению на ТВ-изображении характерного рисунка в виде чередующихся светлых и темных полос («полосатость» изображения), направление которых не совпадает с кристаллографическими плоскостями или геометрии ФПЗС. В табл. 3.3 показаны дефекты ТВ-изображения и возможные причины их появления.

Перейдем к анализу основных технологических операций и используемых материалов, оценке их вклада в технологичность процесса и параметры изготавливаемых ФПЗС.

Исходные кремниевые пластины. Оценку и выбор проводят по следующим характеристикам: плотность «врожденных» дефектов; неоднородность распределения удельного сопротивления и плотности центров генерации-рекомбинации; механическая прочность как показатель вероятности образования дислокаций, линий скольжения, а также боя (поломки) пластин; способность к образованию внутреннего геттера; степень образования дефектов при технологических термообработках.

«Врожденные» дефекты возникают при выращивании и зонной очистке слитка кремния и делятся на *нульмерные* — точечные

Таблица 3.3

Виды и дефекты ТВ-изображения, формируемого ФПЗС

Дефект ТВ-изображения	Дефект структуры, вызывающий дефект изображения	Процессы, ответственные за появление дефекта структуры
Темные: области вертикальные и горизонтальные полосы точки	КЗ канала переноса КЗ между электродами Разрыв электродов Отсутствие контакта	Фотолитография Механическая обработка (царапины)
Светлые: вертикальные полосы, точки пятна, полосы произвольной формы	Генерационные центры в обедненном слое: преципитаты, дислокации Проколы в подзатворном диэлектрике и инъекции из электрода Острова непредусмотренных диффузионных областей	Выращивание слитков Механическая обработка (царапины, нарушенный слой) Технологические термообработки Ориентация фотолитографического рисунка
Серые: пятна вертикальные и горизонтальные полосы	Утечки подзатворного диэлектрика Рекомбинационные центры вне обедненного слоя	Фотолитография Окисление, отмывки, осаждение нитрида кремния Выращивание слитка Технологические термообработки
«Полосатость»	Неоднородность удельного сопротивления и концентрации рекомбинационных центров	Выращивание слитка Технологические термообработки

дефекты типа вакансий и межузельных атомов; *одномерные* — дислокации; *двухмерные* — границы раздела (зерен, двойников, фаз); *дефекты упаковки*; *трехмерные* — поры, включения второй фазы. Плотность врожденных дефектов обычно много меньше плотности дефектов, вносимых при технологических термообработках, однако они могут способствовать образованию последних, потому необходим контроль исходного кремния по плотности и типу врожденных дефектов. Наименьшая плотность точечных и других врожденных дефектов присуща зонному кремнию. В нем наблюдаются только крупные петли дислокаций, которые возникают в результате агломерации точечных дефектов на скоплениях атомов углерода. Плотность дефектов в зонном кремнии лежит на уровне $0,1 \dots 1 \text{ см}^{-2}$. В кремнии, выращенном методом Чохральского, плотность дефектов на $1 \dots 2$ порядка выше, чем в зонном. В основном дефекты здесь вызываются преципитацией кислорода и включениями второй фазы. Кислород попадает в расплав из кварцевого тигля, и резкие колебания его содержания в кремнии связаны с трудноконтролируемым процессом конвекции. Достичь равномерного распределения кислорода можно двумя путями: компьютеризованным управлением физико-химическими процессами (в первую очередь, конвекцией), определяющими свойства вытягиваемого слитка, или подавлением влияния этих процессов. Многообещающим примером реализации второго направления является вытягивание слитков в осевом магнитном поле напряженностью $10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. Магнитное поле подавляет конвекцию, что позволяет снизить радиальный разброс примесей, и в том числе кислорода до $2 \dots 3 \%$. При этом также нейтрализуется вредный эффект образования термодоноров. Равномерное насыщение магнитного кремния кислородом приводит к повышению механической прочности. Это объясняется тем, что осаждающийся в междоузлиях кислород блокирует рост и движение дислокаций (аналогичный эффект вызывает осаждение азота). Наименьшей прочностью обладает зонный кремний, в котором концентрация кислорода ниже, чем в любом другом типе кремния. Введение в зонный кремний азота существенного улучшения прочности не вызывает [67]. Способность к образованию внутреннего геттера особенно важна в технологии ПЗС. Такое требование к исходному кремнию появилось только с развитием ПЗС и обусловлено необходимостью предельно снизить плотность генерационно-рекомбинационных центров. Оксидный геттер в кремнии, выращенном по Чохральскому, позволяет снизить плотность дефектов до уровня, меньшего, чем в зонном кремнии: $0,5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ и $2,5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ дислокаций; $0,8 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ и $2,5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ дефектов упаковки. У ФПЗС, изготовленных на пластинах кремния с внутренним геттером, плотность светлых точек на ТВ-изображении снизилась в 2,5 раза по сравнению с пластинами зонного кремния [67].

Неоднородность удельного сопротивления и плотности генерационных центров вызывается колебаниями скорости выращивания слитка и температуры. Неоднородность такого рода дости-

гает максимума на периферии слитка. На ТВ-изображении, формируемом ФПЗС, неоднородность проявляется в виде характерных концентрических светлых и темных полос. Отклонение видеосигнала при этом составляет несколько процентов (от среднего значения), но «полосатость» отчетливо заметна на ТВ-экране. В [67, 68] детально исследована природа «полосатости» и показано соответствие между расположением полос и неоднородностью как удельного сопротивления, так и плотности генерационных центров. Колебания удельного сопротивления наиболее выражены в зонном кремнии (достигают 30 % от среднего значения). Кремний, выращенный по Чохральскому, более равномерен (разброс 15 ... 20 %). Полностью лишен этого дефекта магнитный кремний, при выращивании которого подавлена конвекция и во многом обусловленные ею микроколебания скорости роста и температуры.

Зонный кремний. Основные недостатки — сильно выраженная неоднородность удельного сопротивления и низкая механическая прочность. Достоинство — низкая концентрация врожденных дефектов. Зонный кремний наиболее чувствителен к технологическим термообработкам, в нем появляются дислокации и дефекты упаковки (скорее всего, это связано с низкой прочностью). В зонном кремнии неосуществимо внутреннее геттерирование, поскольку для образования оксидного геттера концентрация кислорода в кремнии должна превышать предел растворимости при температурах технологических обработок, а это условие выполняется только в кремнии по Чохральскому.

Кремний по Чохральскому, выращенный в магнитном поле. Обладает максимальными механической прочностью и однородностью, устойчив к термообработкам, хотя склонен к образованию дефектов упаковки из-за трудности внутреннего геттерирования. Концентрация кислорода (до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) достаточна для ограничения роста дислокаций, но мала для того, чтобы создать хороший оксидный геттер, поэтому рекомендуется использовать дополнительное внешнее геттерирование. По плотности врожденных дефектов сравним с зонным кремнием.

Кремний по Чохральскому с оксидным геттером. Возможно, такой кремний является наиболее подходящим для ФПЗС, поскольку объединяет высокую механическую прочность и сравнительно низкую неоднородность с устойчивостью к термообработкам, обусловленной внутренним геттером. Оптимальная [57, 67] концентрация межзерельного кислорода ($1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) позволяет достичь высокой плотности оксидных преципитатов в подложке при ширине бездефектной зоны примерно 50 мкм в результате трехступенчатого исходного геттерирования: 3 ч при 1100 °С в азоте; 10 ч при 650 °С в азоте и 4 ч при 1100 °С в кислороде.

На выход годных ФПЗС, помимо качества поверхности пластин, влияет ориентация фотолитографического рисунка относительно базового среза пластины. Плотность дислокаций, возникающих в процессе технологических термообработок, может быть зна-

чительно снижена, если располагать протяженные элементы ФПЗС — линии поликремниевых электродов, границы полевого оксида — вдоль направления $\langle 100 \rangle$ вместо направления $\langle 110 \rangle$ на пластинах, поверхность которых ориентирована в плоскости (100). При этом существенно снижается плотность светлых точек и линий, выход годных ФПЗС (по этому виду дефектов) возрастает на 45 % по сравнению с направлением $\langle 110 \rangle$ [67]. Объясняется такой эффект тем, что границы поликремниевых, оксидных, диффузионных областей выступают в качестве концентраторов механических напряжений, увеличивая вероятность появления дислокаций при совмещении границ с направлением, в котором прочность кремния мала.

Подзатворная диэлектрическая система. Используемый в ПЗС слой термического оксида должен быть весьма высокого качества — (заряд в оксиде минимальным, поверхностный потенциал стабильным, плотность поверхностных состояний минимальной), кроме того, оксид должен быть свободным от проколов и локальных нарушений диэлектрических свойств. Обычный метод окисления в сухом кислороде не обеспечивает требуемых характеристик оксида, и в технологии ПЗС повсеместно используют окисление в кислороде с добавкой галогенов (точнее, галогеноводородов). Известны многочисленные способы введения вместе с кислородом хлора, газообразного хлористого водорода, четыреххлористого углерода, трихлорэтилена и т. д. Наилучшие результаты дает добавление в концентрациях 0,3 ... 1,5 % хлористого водорода и трихлорэтилена (с последним веществом проще работать). Рассмотрим основные достоинства метода окисления с добавлением галогеноводородов:

уменьшение исходного заряда в оксиде и стабилизация поверхностного потенциала: добавка паров соляной кислоты к кислороду позволяет исходный заряд в оксиде снизить с 10^{12} см^{-2} до 10^{11} см^{-2} . Достаточно признанный механизм этого явления таков: галогены (хлор и хлорсодержащие частицы) внедряются в оксид и захватывают ионы натрия, причем связь с натрием значительно сильнее связи натрия с металлами, так что даже создание алюминиевых электродов не изменяет заряд оксида (как это обычно наблюдается для оксидов, выращенных в сухом кислороде). Установлено, что ионы галогенов скапливаются в узкой зоне (1,5 нм) у границы раздела кремний — оксид. Важно помнить, что отжиг хлорного оксида приводит к потере его ценных свойств. Объяснить это можно, предположив, что образуется комплекс, в котором хлор нейтрален, но в силу большого сродства к иону натрия связывает его. Вероятность образования комплексов зависит от ориентации кремния, концентрации хлористого водорода и содержания воды в окислительной среде. При повторном отжиге, как показывают спектрограммы, комплексы разрушаются. Помимо существенно меньшего заряда, у хлорных оксидов мало изменение потенциала плоских зон после термополевой обработки: около 0,5 В после обработки при 150°C и напряженности поля $1,2 \cdot 10^6 \text{ В/см}$;

уменьшение плотности поверхностных состояний. Добавление всего 0,3 %-ного хлористого водорода приводит к снижению на порядок плотности поверхностных состояний с энергией, соответствующей середине запрещенной зоны. Высокотемпературный отжиг в водороде позволяет дополнительно понизить плотность поверхностных состояний до значений, меньших чем $1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, которые уже трудно измерить. Водород весьма активен и заполняет оборванные связи на границе раздела кремний — оксид. Плотность поверхностных состояний падает; заряд при этом мало изменяется. Может быть рекомендован режим получения хлорного оксида с плотностью поверхностных состояний около 10^{10} см^{-2} для ориентации (100) — окисление с добавкой 0,3 %-ного хлористого водорода и отжиг после металлизации при 450°C в водороде 30 ... 45 мин [69];

уменьшение числа дефектов в оксиде и улучшение диэлектрических свойств. Добавление соединений водорода с галогенами позволяет существенно понизить плотность «слабых» участков в оксиде. Если считать, например, слабыми участками локальные МОП-структуры с пробивным напряжением, меньшим 80% от предельного пробивного напряжения данного оксида, то плотность подобных дефектных структур снижается со 100 см^{-2} до $10 \dots 12 \text{ см}^{-2}$ при добавлении 1 ... 3 % галогеноводородов. На зависимости плотности дефектных структур от процентной добавки галогенов (хлора) и соединений галогенов с водородом (хлористый и бромистый водород, трихлорэтилен) и углеродом (четырёххлористый углерод) заметен характерный минимум, причем для соединений, содержащих водород, минимум растянут, т. е. результат слабее зависит от содержания добавки в кислороде. После минимума плотность дефектов довольно резко возрастает с увеличением процента галогенов; очевидно, происходит локальное растравливание оксида, и пробой развивается в участках с меньшей толщиной. У хлорных оксидов предельные пробивные напряжения несколько выше, чем у кислородных, но, главное, заметно снижается разброс значений пробивных напряжений, повышается воспроизводимость процесса;

увеличение скорости окисления — примерно в 1,5 раза возрастает скорость окисления при добавках галогенов. При этом увеличивается параболическая составляющая, характеризующая процесс диффузии реагентов сквозь оксид;

подавление роста дефектов упаковки. При окислении в сухом кислороде, особенно при длительном, когда требуются толстые оксиды, на поверхности кремния возрастают дефекты упаковки. Механизм возникновения подобных дефектов связан с эмиссией вакансий из нарушенных участков поверхности кремния, или, иными словами, адсорбцией атомов кремния в этих участках. Если на границе раздела оксид — кремний создать равновесную концентрацию вакансий выше, чем концентрация дефектов, то эмиссия подавляется, и дефекты не только не растут, но распадаются. При хлорном окислении часть атомов уходит с хлором, на их месте остаются вакансии. В результате при хлорном окис-

лении с правильно подобранным режимом никогда не возникает дефектов упаковки, а если обычный оксид с дефектами подвергнуть окислению с добавлением галогенов, то имевшиеся дефекты упаковки распадаются (кстати, если хлорный оксид без дефектов окислить в сухом кислороде, то дефекты вырастают вновь). Однако при неправильно выбранном режиме окисления подавление дефектов упаковки может и не наблюдаться. Так, в [70] проводилось окисление при 1100 °С и 1200 °С с содержанием газообразного хлористого водорода в кислороде 0...10 % (объемных). После этого хлорный оксид удаляли, и пластины длительно (до 6 ч) окисляли в сухом или влажном кислороде для того, чтобы вызвать генерацию дефектов упаковки. Эффективное подавление дефектов упаковки имело место при повышенной температуре окисления (1200 °С). Производство концентрации хлористого водорода на время окисления является при данной температуре константой;

очистка реакционных камер, труб и другой кварцевой оснастки. Предварительная высокотемпературная и достаточно длительная (десять часов) обработка кварцевой трубы в кислороде с 10 % добавкой хлористого водорода на порядок понижает содержание натрия в оксидах, выращиваемых затем в чистом кислороде. При переходе на низкотемпературную технологию стали шире применять пироженное окисление в смеси кислорода и водорода с добавками хлористого водорода. Оксиды, полученные пироженным способом, намного стабильнее и менее дефектны, нежели оксиды, выращенные в атмосфере кислорода с добавкой паров воды из внешнего питателя. Даже бидистиллированная вода, подаваемая в реактор извне, не обеспечивает такой чистоты, как вода, образующаяся непосредственно в окислительном реакторе в результате реакции соединения кислорода с водородом.

В технологии ФПЗС второго поколения на подзатворный оксид осаждают (с перерывом не более 0,5 ч) слой нитрида кремния. Нитрид кремния выращивают в горизонтальном реакторе с пониженным давлением из смеси дихлорсилана и аммиака при температуре около 830 °С. Сведения о получении слоев нитрида кремния и их свойствах можно найти в [71]. Для стабилизации выращенного нитридного слоя его следует подвергнуть уплотнению — отжигу в окислительной среде при 900...1000 °С.

Фотолитография. В первую очередь возникает проблема фотошаблонов. Основным требованием к шаблонам является бездефектность, тем более, что шаблоны для крупноформатных линейных и матричных ФПЗС имеют большие критические площади структур. О том, как сильно зависит от плотности дефектов фотолитографии выход годных структур, уже говорилось, плотность дефектов на шаблоне, естественно, должна быть еще ниже. Наилучшие характеристики по [72] имеют фотошаблоны с маскирующим покрытием из оксида железа — около 10^{-2} см⁻². Большие размеры структур вообще являются бедствием, так как изготовление объективов для фотоповторителей с диаметром поля 25...30 мм весьма серьезная задача. Поэтому приходится изготавли-

вать две и более частей структуры и затем их «сшивать». Хотя этот прием усложняет изготовление шаблонов, но позволяет получать шаблоны с большими полями. Подобный метод фотоконпозиции описан в [73].

Не будет преувеличением сказать, что фотошаблоны для ПЗС относятся к высшей категории сложности, для их изготовления необходимо самое современное оборудование, использование методов машинного проектирования, автоматизированного контроля. В комплект обычно входит 8...12 шаблонов, стоимость разработки комплекта оценивается по зарубежным данным в несколько тысяч долларов. И тем более фатально выглядит то обстоятельство, что дорогостоящие фотошаблоны при контактной фотолитографии быстро изнашиваются и их приходится заменять новыми через 20...50 контактов. Картина износа и выхода шаблона из строя одинакова — появляются царапины и отверстия в непрозрачных участках, выколки стекла. Основная причина этого заключается в попадании между шаблоном и пластиной с резистом твердых частиц: пыли, осколков кремния и стекла. Борьбаться с подобным явлением следует по трем направлениям:

применять кремниевые пластины максимально прочные, с закругленным краем;

тщательно очищать производственную среду. Можно найти связь между количеством частиц, осевших на единицу поверхности пластины за единицу времени, и их концентрацией в воздухе. Для обеспечения 96 % выхода годных среднеформатных матричных ФПЗС надо, чтобы на пластину диаметром 76 мм за 5...10 мин оседало не более восьми частиц. Это соответствует четырем частицам в 1 л воздуха. Если учесть, что в 1 л воздуха городского района содержится 40 000 частиц, то нетрудно представить, сколь сложна очистка производственной среды;

уменьшать усилие прижима между шаблоном и пластиной в установках совмещения. Снижение усилия в 4 раза уменьшает темп накопления дефектов на шаблоне в 6 раз.

Наиболее радикальной мерой является переход от контактной фотолитографии к проекционной. Современные проекционные установки типа ЭМ-584 позволяют получать размеры 1,5...2 мкм, требуемые в фотолитографии ФПЗС, при высокой точности совмещения.

Проекционная фотолитография устраняет проблему износа фотошаблонов и резко снижает брак из-за отсутствия контакта между шаблоном и пластиной.

Поликремниевые слои и система поликремний — оксид — поликремний. К поликремниевым слоям, используемым в качестве электродов, предъявляются следующие требования:

равномерность по толщине (на диаметре пластины, от пластины к пластине и между партиями пластин);

зеркальная поверхность без включений, мелкозернистая структура. Включения приводят к нарушению оксида на поликремнии и к утечкам и коротким замыканиям в межэлектродной изоляции,

а от размеров зерен зависят уровень легирования и качество травления при фотолитографии;

высокая адгезия осажденного слоя к оксиду.

Качество процесса выращивания поликремниевых слоев следует оценивать комплексно, с учетом характеристик получаемых МОП-структур (электрод — оксид — кремний). Подбор оптимальных режимов выращивания проводят, измеряя не только толщину слоев, но и такие параметры, как поверхностное сопротивление после легирования, напряжение плоских зон и время релаксации тестовых МОП-структур, степень растравливания при фотолитографии.

Для выращивания поликремниевых слоев применяют процесс пиролиза моносилана, идущий с достаточной скоростью при 650 ... — 750 °С. Выращивание проводят в горизонтальных реакторах из смеси водорода с моносиланом (4 ... 100 % моносилана). В реакторе создается давление ниже атмосферного: с одного конца реактора присоединен форвакуумный насос с промежуточным фильтром, а с другого впускается аргон-моносилановая смесь; разрежение поддерживают на уровне 20 ... 10² Па. При этом процесс осаждения поликремния лимитируется не диффузией реагентов, а химической реакцией на поверхности подложек. В результате скорость осаждения и равномерность осажденных слоев зависят только от температуры процесса, но не от характера движения газа. Пластины можно ставить вертикально, не боясь разбросов по толщине слоев. На вертикальные пластины не попадают частицы аморфного кремния, и поликремниевые пластины получают с зеркальной поверхностью, без включений. Скорость роста слоев составляет около 10 нм/мин; число пластин в загрузке 50 ... 100 шт.

При легировании поликремниевых слоев стремятся, как правило, достичь минимума поверхностного сопротивления, если речь идет об изготовлении крупноформатных матричных ФПЗС, в которых длина электрода может составлять 10 ... 15 мм при ширине 5 ... 8 мкм (сопротивление электрода равно произведению поверхностного сопротивления на отношение длины к ширине).

Наименьшее сопротивление удается получить, комбинируя ионное легирование и диффузию. Так, ионное легирование фосфором с дозой 2000 мкКл при энергии 50 кэВ с последующей диффузией из треххлористого фосфора при 1050 °С в течение 20 мин и окислением при 1200 °С в течение 20 мин дает значения поверхностного сопротивления 4 ... 6 Ом при толщине слоя поликремния 0,5 мкм. Применение только диффузионного легирования позволяет получить вполне приемлемые значения поверхностного сопротивления 10 ... 15 Ом при 1050 °С. При малых временах диффузии поверхностное сопротивление у поликремниевых слоев значительно превышает это же значение у монокристаллического кремния (пластины — спутника). Различие объясняется тем, что фосфор диффундирует преимущественно по границам зерен поликремния, где он электрически неактивен. При увеличении времени

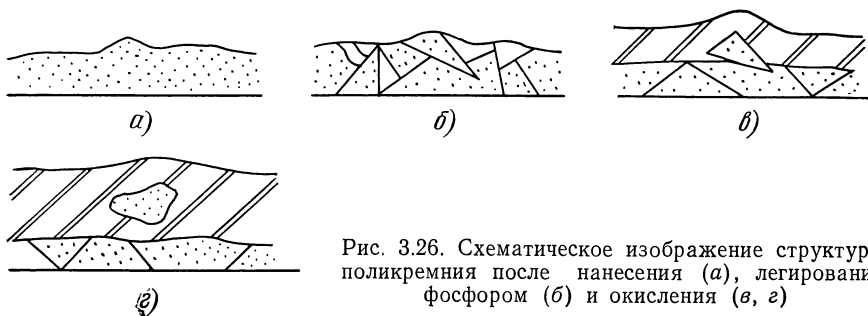


Рис. 3.26. Схематическое изображение структуры поликремния после нанесения (а), легирования фосфором (б) и окисления (в, г)

процесса наступает насыщение, и дальнейшее увеличение длительности легирования мало влияет на поверхностное сопротивление. Проведение высокотемпературной обработки после диффузии способствует снижению поверхностного сопротивления примерно вдвое, скорее всего, из-за изменения структуры поликристаллического слоя. То, что уровень легирования зависит от структуры слоя, подтверждается экспериментальными данными: при увеличении скорости роста поликремния поверхностное сопротивление падает, так как размеры зерна растут, и роль граничных явлений ослабевает.

Зернистая структура поликремния играет решающую роль в формировании многослойной системы поликремний — оксид — поликремний, являющейся основой любого ПЗС. На рис. 3.26 показано схематически строение слоя поликремния после нанесения (а), легирования (б) и окисления (в, г). В исходном слое поликремния размеры зерен лежат в пределах 100 ... 200 нм. Ухудшение качества поликремниевого слоя проявляется в росте шероховатости. После осаждения поликремния на его поверхности могут наблюдаться шероховатость и выпуклости. Последние вызваны аномалиями в процессе роста и сохраняются при легировании и окислении, повторяясь на верхней границе оксида. Шероховатость после легирования и окисления возрастает, причем при низкой температуре окисления этот эффект выражен сильнее. Размеры зерен после легирования фосфором увеличиваются до 300 ... 500 нм; легирование бором, напротив, вызывает уменьшение размеров зерен.

ПАРАМЕТРЫ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ УПРАВЛЕНИЯ

4.1. Параметры линейных ФПЗС

Линейные ФПЗС можно разделить на две группы: ФПЗС общего назначения (1200ЦЛ1,2 и К1200ЦЛ5,6) с основной задачей формирования телевизионного изображения и специализированные (К1200ЦЛ4, ФПЗС-1Л и др.), среди которых особое место занимают линейные ФПЗС для измерительной техники, их назначением является не формирование изображения, а прецизионное определение координат объекта.

Линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ1. Прибор представляет линейку, содержащую 1024 ячейки в виде МОП-накопителей с общим фотозатвором из поликремния [49]. По типу считывания информации он относится к однорегистровым линейным ФПЗС. Транспортный регистр — трехфазный, с поверхностным каналом p -типа, от фотоячеек отделен разрешающим затвором. Однорегистровая конструкция позволяет осуществить эффективное подавление блуминга.

Из 1024 ячеек фоточувствительными являются только 1015 ячеек. Первые от выходного устройства девять ячеек закрыты алюминиевым экраном и используются для привязки к уровню *черного*, т. е. позволяют снимать выходной сигнал с точностью до неоднородности темнового тока (в [49] неточно указано число экранированных фотоячеек). Фоточувствительные ячейки накрыты поликремниевым фотозатвором толщиной 0,5 ... 0,6 мкм. Чувствительность К1200ЦЛ1, как и всех ФПЗС с МОП-накопителем, затвор которого сформирован из поликремния такой толщины, резко падает в синей части спектра.

В течение периода накопления на фотозатвор подается высокий уровень смещения, а на разрешающий затвор — низкий. За некоторое время (примерно равное половине периода тактового напряжения) до окончания периода накопления на разрешающий затвор подаются импульсы высокого уровня смещения.

В течение времени переноса регистр останавливается, прием зарядов осуществляется под вторую и (или) третью фазы. Тактовая диаграмма включает также импульсные последовательности, подаваемые на фазовые электроды, затвор транзистора сброса и входной диод (для электрического ввода фонового заряда).

Антиблуминговое устройство представляет собою многоисточковый МОП-транзистор с общим затвором и стоком, истоками которого являются фотоячейки. Регулируя смещение на затворе, устанавливают высоту потенциального барьера, который определяет максимальный уровень заполнения потенциальных ям МОП-

накопителей. Затвор антиблуминга может использоваться также для улучшения выходного сигнала, если время накопления меньше времени считывания (обычно оно больше или равно). На фотозатвор в этом случае подают постоянное смещение, а затвор антиблуминга включается в промежуток времени между окончанием периода накопления (закрывается разрешающий затвор) и началом нового процесса накопления. Накапливающиеся за этот промежуток паразитные носители попадают не в регистр, а в сток антиблуминга, искажения выходного сигнала пропадают. Значительную долю паразитных носителей представляют носители, фотогенерированные на периферии. Для уменьшения влияния периферийной засветки, помимо антиблуминга, предусмотрены следующие меры:

- формирование охранной диффузионной области вокруг активной области прибора;

- расположение соединительных шин фазовых электродов таким образом, чтобы они образовали как бы трехфазную ячейку ПЗС, в которой заряды движутся от регистра к периферии;

- использование алюминиевого экрана, который закрывает большую часть кристалла.

Выходное устройство представляет собою плавающую диффузионную область, транзистор сброса и двухкаскадный истоковый повторитель с нагрузочным транзистором в первом каскаде. Затвор и исток нагрузочного транзистора выведены наружу, что обеспечивает максимальную свободу выбора рабочей точки. Предусмотрен компенсационный повторитель, аналогичный основному. Подключение выходов основного и компенсационного повторителей к дифференциальному усилителю позволяет подавить наводку от работы транзистора сброса. На практике полное подавление не достигается из-за неидентичности характеристик повторителей, но в [50] показано, что таким способом наводку можно снизить на 1 ... 2 порядка. Входное устройство содержит входной диод и два входных затвора. При электрическом вводе сигнала К1200ЦЛ1 работает как линия задержки с регулируемым временем задержки 9 ... 20 мс, коэффициентом нелинейных искажений 0,6 %, коэффициентом частотных искажений ± 1 кГц (в диапазоне 20 ... 100 кГц) и динамическим диапазоном более 50 дБ [51]. Основное назначение входного устройства — ввод фонового заряда, величина которого составляет примерно 10 % от максимального информационного заряда.

Транспортный регистр содержит 1032 элемента, из которых один элемент является буферным (между входным устройством и основной частью регистра), 1015 элементов служат для приема фотогенерированных носителей, девять — для приема темнового сигнала, а первые (от ПДО) семь предназначены для отсчета уровня фона. Для расширения динамического диапазона производят выборку сигнала в темноте с любого из первых семи элементов регистра, несущих электрический фоновый заряд, и после измерения темнового сигнала в каждой ячейке относительно уровня

фона — запоминание его. Далее, вычитая из выходного сигнала (отсчитанного от уровня фона) уровень темнового сигнала в каждом элементе, определяют величину собственного сигнала. Как подчеркивается в [49], привязка по уровню фона должна производиться в каждой строке, поскольку практически уровень фона имеет не только электрическую, но и оптическую составляющие (паразитная засветка).

Выпускаются ФПЗС типа К1200ЦЛ1 в металлокерамическом корпусе с 24 выводами (шаг 2,5 мм), расположенными в два ряда перпендикулярно основанию корпуса. Ключ в виде точки расположен у первого вывода. В крышку впаяно оптическое окно из лейкосапфира. Между окном и кристаллом размещена пластмассовая бленда, защищающая от света периферийные области. Габаритные размеры прибора $20 \times 11 \times 3,9$ мм; размер фоточувствительной ячейки 15×15 мкм; шаг 15 мкм [52]. Значения емкостей электродов: фазового 300, разрешающего 200, фотозатвора 50 пф. Основные параметры К1200ЦЛ1 [49]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,4
Интегральная чувствительность при времени накопления 4 мс, В/лк	Не менее $2,4 \cdot 10^{-3}$
Неравномерность чувствительности, %	Не более 8
Коэффициент передачи модуляции на 512 ТВ-линиях, %	Не менее 40
Неравномерность темнового сигнала (% от сигнала насыщения)	Не более 4
Пороговая освещенность, лк	Не более 0,25

Пороговая освещенность 0,25 лк при времени накопления 4 мс соответствует примерно $8 \cdot 10^3$ фотонов. Это значение подтверждается экспериментальными данными [52]: $(6,5 \dots 7,5) \cdot 10^3$ фотонов на длине волны 0,55 мкм. В [52] снята в широком диапазоне освещенности свет-сигнальная характеристика К1200ЦЛ1 (рис. 4.1), определена чувствительность для длины волны 0,55 мкм, равная приблизительно 0,7 мкВ/фотон. Показано также, что при охлаждении до температуры кипения азота порог обнаружения снижа-

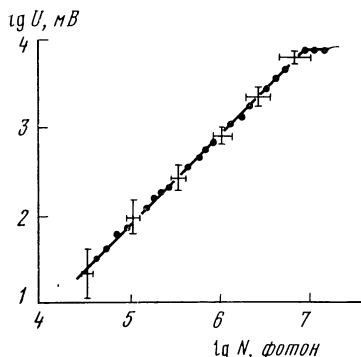


Рис. 4.1. Свет-сигнальная характеристика К1200ЦЛ1

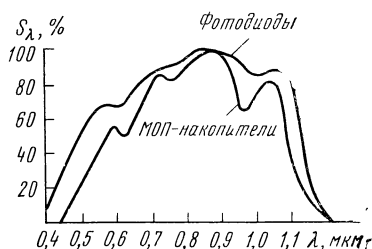


Рис. 4.2. Типичные характеристики спектрального распределения чувствительности ФПЗС с МОП-накопительными и фотодиодами

ется до 20 фотонов на ячейку, т. е. К1200ЦЛ1 может использоваться для регистрации отдельных фотонов. На рис. 4.2 приведена характеристика спектрального распределения чувствительности (толщина поликремниевого МОП-электрода 0,5 ... 0,6 мкм), в равной мере относящаяся ко всем ФПЗС с МОП-накопителями при толщине поликремниевого электрода около 0,5 мкм (К1200ЦМ1, К1200ЦМ7, К1200ЦМ8 и др.). На длине волны 0,45 мкм чувствительность составляет 10 ... 15 % от максимальной, соответствующей 0,8 ... 0,85 мкм.

Линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ2. Это линейный ФПЗС на 2048 элементов разложения с фотодиодными ячейками, двухрегистраый, трехфазный. В выходном устройстве транзистор сброса снабжен экранирующим затвором, что позволяет уменьшить наводку от импульсов сброса, но снижает чувствительность, так как часть информационного заряда, локализованная под экранирующим затвором, для индикации оказывается потерянной. Кроме того, снижается предельная тактовая частота из-за увеличения длины канала транзистора сброса и уменьшения, поэтому его быстродействия. Если быстродействие не играет существенной роли, выгодно перевести рабочую точку транзистора сброса в область пологих характеристик. Сопротивление канала транзистора при этом возрастает и наводка от импульсов сброса снижается в 4 ... 5 раз [55]. В [54] указывается, что, несмотря на отсутствие устройства антиблуминга, возможна работа К1200ЦЛ2 с защитой от локальных пересветок. Для этого жертвуют одним из регистров (число элементов разложения уменьшается до 1024), т. е. на все его электроды и соответствующий разрешающий затвор подаются смещение высокого уровня. Избыточные фотогенерированные носители из рабочих ячеек, минуя стоп-канальные области, попадают в соседние ячейки, затем в антиблуминговый регистр, объединенные потенциальные ямы которого служат для них стоком, и, наконец, через входное и выходное устройства — во внешнюю цепь. Частотно-контрастная характеристика К1200ЦЛ2, включенного таким образом, лучше, чем у 1024-элементного К1200ЦЛ1, так как геометрическая составляющая частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) определяется непримыкающими друг к другу апертурами фотоячеек.

Выпускается К1200ЦЛ2 в металлокерамическом корпусе с 24 выводами, аналогичном корпусу К1200ЦЛ1 (но несколько большим по длине) с сапфировым оптическим окном и пластмассовой блендой. Основные параметры К1200ЦЛ2 [54]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 1
Интегральная чувствительность при времени накопления 4 мс, В/лк	Не менее $8,2 \cdot 10^{-3}$
Неравномерность интегральной чувствительности, %	Не более 10
Коэффициент передачи модуляции на 1024 ТВ-линиях, %	Не менее 50
Неравномерность темнового сигнала при времени накопления 4 мс, % от сигнала насыщения	Не более 3
Емкость фазы регистра	400 пФ
Емкость накопительного затвора	200 пФ

Функциональное назначение выводов и типовые значения смещений приведены в [53, 73]. Регистры $P1$ и $P2$ с поверхностным каналом p -типа снабжены независимыми входными и выходными устройствами [54]. Фотодиодные ячейки размером $12 \times 10 \text{ мкм}^2$ расположены с шагом 12 мкм и отделены друг от друга стоп-канальной областью, выполненной в форме серпантина, чем обеспечивается черезэлементное считывание зарядовых пакетов по двум регистрам (рис. 4.3). Накопительная область сформирована из фотодиодных ячеек Φ и МОП-накопителей (под общим накопительным затвором $H3$), разделенных барьерным затвором $B3$. Введение барьерного затвора позволяет независимо от смещения на накопительном затворе регулировать обратное смещение ФД. Для отсчета уровня черного в строке 48 фотодиодов (2001 ... 2048) закрыты слоем алюминия.

Передача зарядовых пакетов в регистры считывания $P1$, $P2$ производится под электроды второй, третьей либо обеих фаз вместе, т. е. на время передачи (соответствует длительности импульса T_c на разрешающих затворах $P34$ или $P32$) указанные фазы должны находиться под смещением высокого уровня. Каждый транспортный регистр содержит, как и в К1200ЦЛ1, по 1032 элемента, из которых восемь элементов (семь у выхода и один у входа) служат для привязки к уровню фона. Регистры начинаются электродом первой фазы и заканчиваются электродом третьей фазы. На рис. 4.4 ($ЗТС1$, $ЗТС2$ — затворы транзисторов сброса) приведена тактовая диаграмма работы К1200ЦЛ2. Для того чтобы мультиплексировать выходные сигналы обоих регистров, фазы регистров должны быть сдвинуты относительно друг друга.

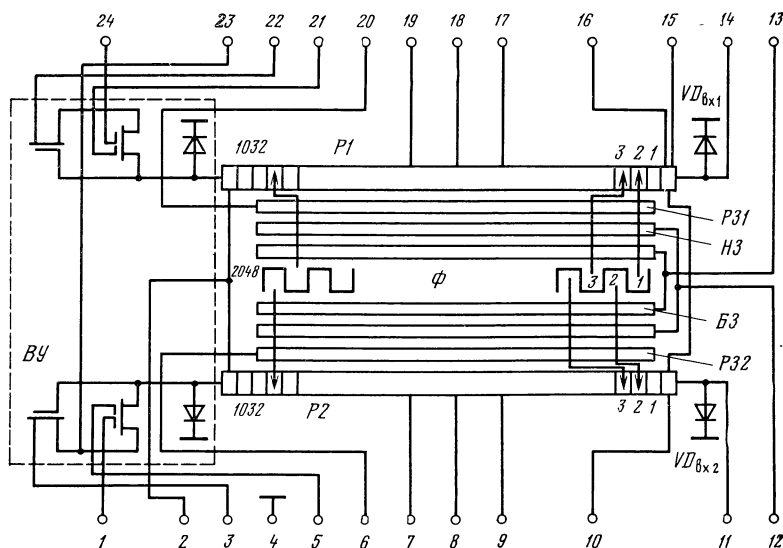


Рис. 4.3. Структурная схема линейного ФПЗС К1200ЦЛ2

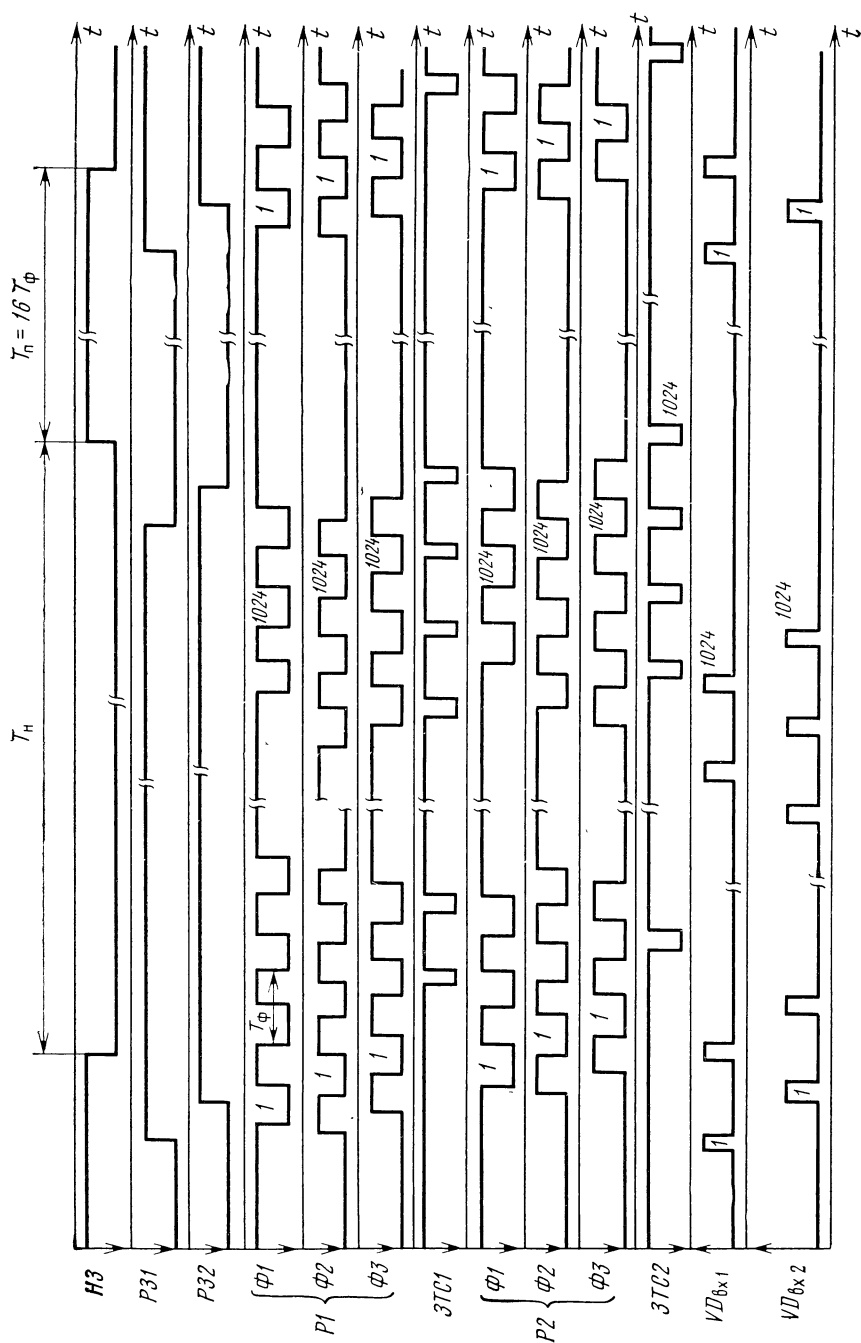


Рис. 4.4. Тактовая диаграмма ФПЗС К1200ЦЛ2

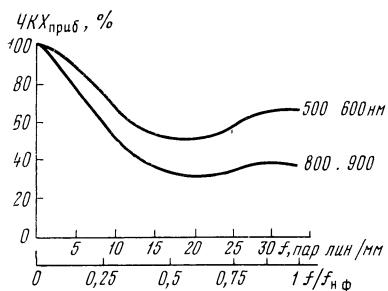


Рис. 4.5. Частотно-контрастная характеристика К1200ЦЛ2

Выходное устройство ВУ состоит из плавающей диффузионной области, транзистора сброса с дополнительным экранирующим затвором и однокаскадного истокового повторителя с внешней нагрузкой в несколько килоом. Для управления транзистором сброса может быть использована импульсная последовательность третьей фазы. В [56] приводятся данные о пороговой освещенности К1200ЦЛ2 (для десяти образцов) как функции времени на-

копления. Без охлаждения пороговая освещенность составляла 10 ... 0,1 лк у худшего и лучшего приборов соответственно. Применение компенсации темнового тока снижает эти значения до 3 и 0,03 лк. Компенсация осуществлялась следующим образом: в транспортный регистр электрически вводили инвертированный темновой сигнал, полученный заранее путем остановки регистра на время, равное времени накопления, в результате чего при считывании фотогенерированных зарядовых пакетов темновая составляющая подавлялась. Применение фотодиодных ячеек заметно улучшает спектральную характеристику чувствительности К1200ЦЛ2 (рис. 4.2) по сравнению с ФПЗС, имеющими МОП-накопители: на длине волны 0,45 мкм чувствительность превышает 35%, а на длине волны 0,4 мкм составляет примерно 10% от максимального значения. Частотно-контрастная характеристика К1200ЦЛ2 показана на рис. 4.5 для двух диапазонов длин волн [57]. Заметно ухудшение ЧКХ из-за диффузионного размывания зарядов, генерированных в глубине подложки длинноволновыми фотонами. Минимум ЧКХ на половине частоты Найквиста характерен для двухрегистровой конструкции линейного ФПЗС (К1200ЦЛ2). Объясняется это тем, что пространственная частота, равная половине частоты Найквиста для фотоячеек $f_{н.ф}$, для транспортного регистра является частотой Найквиста, при которой чередуются заполненные и пустые ямы и влияние неэффективности переноса на работу регистра максимально. При пространственных частотах $f_{н.ф}/2 < f \leq f_{н.ф}$ влияние неэффективности переноса ослабевает с увеличением частоты и при $f = f_{н.ф}$ значение коэффициента модуляции не зависит от неэффективности переноса, так как в одном регистре все потенциальные ямы будут заполненными, а во втором — пустыми [57].

Линейные ФПЗС типов К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6. По числу элементов ФПЗС К1200ЦЛ5 (1024 элементов) близок к К1200ЦЛ1, а К1200ЦЛ6 (2048 элементов) к К1200ЦЛ2. На рис. 4.6 приведена структурная схема, общая для этих типов ФПЗС. Компоновка К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6 аналогична К1200ЦЛ2: билинейная организация транспортных регистров, отделенных от фотодиодов системой из трех затворов; оснащение каждого регистра входным и

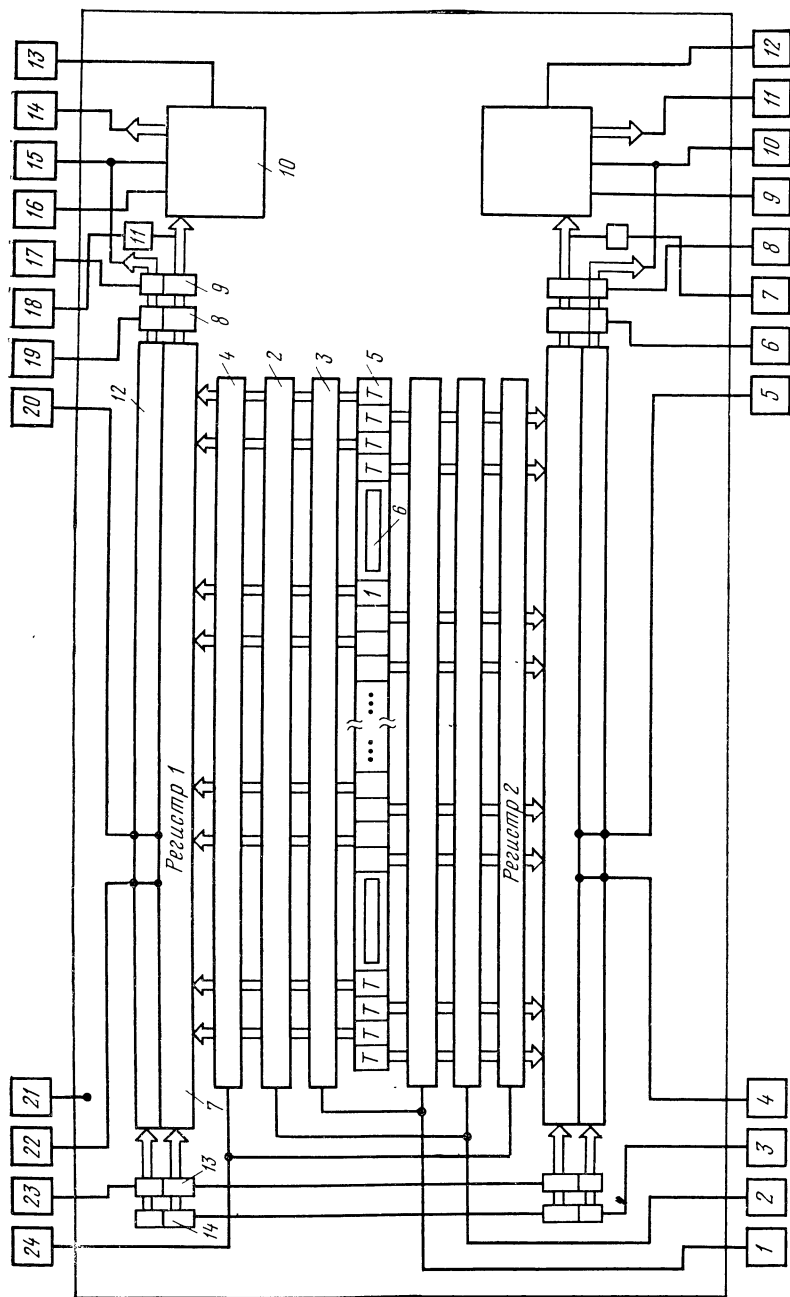


Рис. 4.6. Структурная схема ФПЗС K1200ЦЛ5 и K1200ЦЛ6 (цифрами в квадратах обозначены номера выводов, представленных в табл. 4.1):

1 — линейка фотодиодов, 2 — накопительный затвор; 3 — барьерный затвор, 4 — разрешающий затвор, 5 — темновые и 6 — изолирующие ячейки; 7 — транспортный регистр; 8 — ускоряющий электрод; 9 — выходной затвор, 10 — выходное устройство; 11 — транзистор сброса; 12 — дополнительный регистр для сброса периферийных носителей, 13 — входной затвор, 14 — входной дюр

выходным устройствами. Спектральная характеристика подобна спектральной характеристике К1200ЦЛ2.

Однако при внешнем сходстве конструкций между ними существуют принципиальные различия, определяющие качественно иной уровень ФПЗС второго поколения, к которым относятся К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6.

Приборы К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6 [58] с профилированным объемным каналом *n*-типа, применение которого повышает эффективность переноса и частотный предел работы ФПЗС. Переход от трех- к двухфазной системе управления переносом заряда существенно упрощает эксплуатацию. Если для работы К1200ЦЛ2 необходимо подвести пять различных логических импульсных последовательностей, то в данном случае — три. Тактовая диаграмма двухфазного режима приведена на рис. 4.7.

Приборы могут работать и в *полуторафазном режиме*, для чего необходимо удвоить амплитуду фазовых импульсов. При этом сокращается еще на единицу число требуемых импульсных последовательностей. Дополнительное упрощение эксплуатации К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6 обеспечивается возможностью управления регистрами в *непрерывном режиме* без остановки на время параллельного переноса пакетов из фоточувствительного накопителя в регистры.

Для снижения влияния паразитной засветки ФПЗС снабжены двумя дополнительными сдвигowymi регистрами, расположенными параллельно основным со стороны, противоположной накопителю. Дополнительные регистры имеют общее с основными регистрами управление и предназначены для сбора паразитных носителей заряда с периферии кристалла.

В конструкции данных ФПЗС отсутствует антиблуминг, но в качестве него может быть использован, как и в К1200ЦЛ2, один из транспортных регистров. Однако при этом число фоточувствительных элементов сокращается вдвое.

Линейка фоточувствительных элементов дополнена четырьмя экранированными от света *p-n*-переходами (*темновыми ячейками*) в начале и четырьмя в конце. Они предназначены для отсчета уровня черного и отделены от фотодиодов *изолирующими* ячейками — обратносмещенными *p-n*-переходами, имеющими, в отличие от фотодиодов, гальваническую связь с накопительным за-

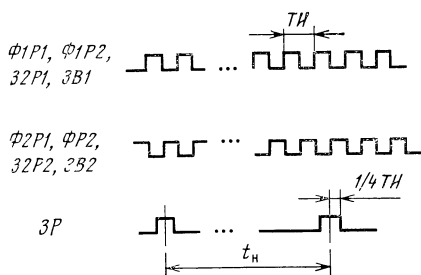


Рис. 4.7 Тактовая диаграмма ФПЗС К1200ЦЛ5 и К1200ЦЛ6:

$ТИ$ — период тактовых импульсов; t_n — время накопления; $\Phi 1Р1$, $\Phi 1Р2$ — фаза первая регистров 1 и 2, $\Phi 2Р1$, $\Phi 2Р2$ — фаза вторая регистров 1, 2, $32Р1$, $32Р2$ — ускоряющие затворы транзисторов сброса (восстановителя), $3Р$ — затвор разрешающий

твором. Протяженность изолирующих ячеек равна протяженности четырех фотодиодов, они предотвращают искажение уровня черного при переполнении крайних элементов фоточувствительного накопителя. Размер фотодиодной ячейки 13×13 мкм², шаг 13 мкм.

Число элементов регистров превышает число элементов разложения вместе с темновыми и изолирующими ячейками на шесть со стороны выходного устройства и на три элемента со стороны входного. Сумма элементов каждого регистра определяется выражением $N_p = N/2 + 17$, где N — число фотоячеек. Для сохранения возможности восстановления исходной последовательности зарядовых пакетов при мультиплексировании выходных сигналов первый регистр короче второго на пол-элемента. В составе электродной структуры регистров предусмотрены также ускоряющие электроды, расположенные между фазовыми электродами и выходными затворами регистров (рис. 4.6). Они имеют малую емкость, что позволяет подавать на них управляющие фазовые импульсы без искажения формы.

Выходные устройства регистров, выполненные по схеме двухкаскадного истокового повторителя, дополнены встроенным между каскадами транзистором выборки — хранения, который осуществляет стробирование выходного сигнала, в частности подавление помехи от транзистора сброса.

Выведенный отдельно затвор нагрузочного транзистора, включенного в цепь активного транзистора первого каскада, позволяет изменять положение рабочей точки повторителя. Транзистор второго каскада включается с внешней нагрузкой. При эксплуатации исток этого транзистора (видеовыход, вывод 11 или 14) во избежание перегорания алюминиевых дорожек, ведущих к стоку, не должен касаться подложки или стока (общего электрода подачи питания).

Регистры оснащены входными устройствами, каждое из которых включает общие входной затвор и входной диод и отдельные буферные плавающие диффузионные области. Входные устройства носят тестовый характер, но могут быть использованы для выполнения некоторых вспомогательных служебных функций, например ввода зарядового пакета, соответствующего уровню белого или задержки аналогового сигнала.

Линейные ФПЗС имеют ограниченную защиту от статического электричества, обеспечиваемую охранными диодами и диодно-резисторными цепочками на токоведущих шинах металлизации разводки непосредственно на кристалле. Такая защита исключает двухполярное управление.

Для ФПЗС К1200ЦЛ5, К1200ЦЛ6 использованы металлокерамические корпуса с 24 и 32 выводами, с двухрядным расположением выводов, оптическое окно изготовлено из листового термического стекла. Использование современных технологических методов (изоляции активных элементов с помощью локального

Таблица 4.1

**Назначение выводов К1200ЦЛ5, К1200ЦЛ6 и значение
подаваемых смещений**

Номер вывода		Назначение	Импульсные смещения, В		Постоянные смещения, В
К1200 ЦЛ5	К1200 ЦЛ6		Уровень		
			низ- кий	высо- кий	
1	3	Затвор барьерный	—	—	7
2	4	Затвор накопительный	—	—	14
3	5	Диод входной	—	—	18
4 (22)	6 (28)	Фаза постоянная	3	14	—
5 (20)	7 (26)	Фаза импульсная	3	14	—
6 (19)	8 (25)	Затвор ускоряющий	3	14	—
7 (18)	9 (24)	Затвор транзистора сброса	3	14	—
8 (17)	10 (23)	Затвор выходной	—	—	9
9 (16)	11 (22)	Затвор транзистора выборки	—	—	14
10 (15)	12 (21)	Сток всех транзисторов	—	—	18
11 (14)	13 (20)	Выход 2 (I) регистра	—	—	—
12 (13)	14 (19)	Затвор нагрузочного транзистора	—	—	0
21	27	Подложка	—	—	0
23	29	Затвор входной	—	—	0
24	30	Затвор разрешающий	1,5	15	—

Примечание. Номера в скобках относятся к регистру 1.

оксидирования кремния, формирования двухслойного подзатворного диэлектрика диоксид кремния — нитрида кремния, создания неоднородно легированного объемного канала посредством высокоэнергетической ионной имплантации малыми дозами, низкотемпературного окисления, геттерирования и др.) позволило не только повысить быстродействие ФПЗС, но и улучшить эффективность переноса, повысить напряжение насыщения выходного сигнала и интегральную чувствительность, а также снизить шумы, уровень и неоднородность темнового тока.

В табл. 4.1 приведено функциональное назначение выводов и типовые значения смещения. Отметим, что полярность смещений положительная (относительно подложки), т. е. противоположная полярности ФПЗС с поверхностным каналом *p*-типа [58].

Основные параметры К1200ЦЛ5, К1200ЦЛ6:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В	Не менее 1,4
Интегральная чувствительность при времени накопления 1 мс, В/лк	Не менее $8 \cdot 10^{-3}$
Неравномерность интегральной чувствительности, %	Не более 20
Коэффициент передачи модуляции, %	Не менее 45
Неравномерность темнового сигнала при времени накопления 1 мс, мВ	Не более 25
Временная флуктуация темнового сигнала, мВ . . .	Не более 2

Коэффициент передачи модуляции измерен у К1200ЦЛ5 на 512 ТВ-линиях и тактовой частоте 10 МГц, у К1200ЦЛ6 — на 1024 линиях и 5 МГц соответственно; временная флуктуация темнового тока измерена на частоте 2,5 МГц.

Бленда в конструкции ФПЗС отсутствует, поскольку вся поверхность кристалла, кроме апертурной щели шириною 12 мкм, закрыта слоем алюминия.

Линейный ФПЗС типа ФПЗС-1Л (также обозначается ЛФПЗС-1Л ФППС-1Л). Специализированный прибор, предназначенный для прецизионной измерительной аппаратуры и устройств автоматической фокусировки [59]. Для увеличения числа отсчетов (при заданном шаге элементов) фоточувствительная ячейка имеет многоэлектродную МОП-структуру, позволившую осуществить эффективный способ разложения высокой кратности.

Фоточувствительная область состоит из двух параллельных четырехфазных регистров с поверхностным каналом *p*-типа. Регистры содержат по 500 элементов с шагом 24 мкм и поперечным размером 200 мкм, причем регистры сдвинуты относительно друг друга в продольном направлении на 1,5 мкм. Регистры снабжены с одного конца отдельными устройствами ввода-вывода сигнала, с другого — общим устройством ввода-вывода. Такая конструкция расширяет функциональные возможности прибора. Использование в устройствах плавающего затвора позволяет осуществлять неразрушающее считывание и первичную обработку сигналов на кристалле. При накоплении информационных зарядов смещения высокого уровня подают на электроды одной, двух или трех фаз, считывание производится обычным образом. В четырехфазной системе возможно реализовать восемь состояний, при которых положение центров накоплений в разных циклах накопления будет различным. В результате координатное разрешение повышается в восемь раз, точность координатных измерений соответствует 1/8 шага элементов (шага дискретизации исходного цикла), т. е. 3 мкм. Смещение регистров на 1,5 мкм обеспечивает дальнейшее повышение точности измерений. Для этого развернутое вдоль фоточувствительной области изображение должно в равной степени проецироваться на оба регистра. Информация считывается с обоих регистров, и совместный анализ сигналов приводит к повышению точности измерений до 1,5 мкм, т. е. 1/16 шага дискретизации в исходном цикле. Время получения информации в таком режиме в восемь раз больше времени исходного цикла накопления и считывания. В ФПЗС-1Л функции накопления и переноса совмещены и при равенстве периодов накопления и считывания будет набираться дополнительный световой фоновый заряд, равный информационному. Во избежание этого рекомендуется использовать специальный световой маркер, освещающий незначительную часть фоточувствительной области; как отмечается в [59], таким приемом удастся снизить на 1 ... 2 порядка фоновый заряд.

Основные параметры ФПЗС-1Л:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 1,5
Интегральная чувствительность, В/лк·с:	Не менее 3,
ФПЗС-1Л	не более 20
ФПЗС-1Л-1	Не менее 20
Неравномерность выходного сигнала, %	Не более 10
Неравномерность темнового тока, %	Не более 10
Динамический диапазон, дБ	Не менее 50

В [60] приведены экспериментальные данные о ЧКХ ФПЗС-1Л: на половине предельной частоты коэффициент передачи модуляции составляет примерно 35 %, его значение всецело определяется неэффективностью переноса.

Функциональное назначение выводов и подаваемые смещения приведены в [53, 73].

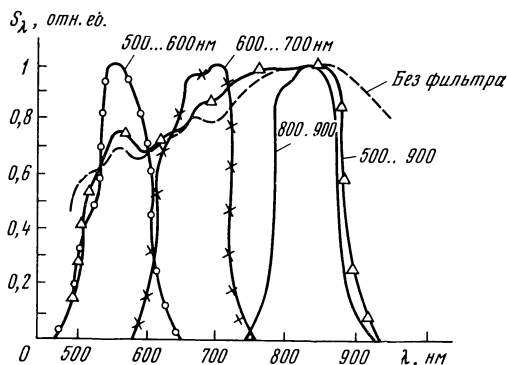
Линейный ФПЗС типа «Квант-2». Подобно ФПЗС-1Л он содержит две параллельно расположенные линейки, однако в качестве фоточувствительных элементов применены фотодиоды размером 12×500 мкм при шаге 12 мкм. Каждая линейка состоит из 794 фотодиодов, расстояние между осями линеек 2445 мкм, а сдвиг вдоль оси относительно друг друга 6 мкм. В [61] приводятся параметры ФПЗС «Квант-2»:

Выходной сигнал насыщения, В	Более 1,5
Экспозиция насыщения, лк·с	Не более 0,2
Неравномерность выходного сигнала, %	Не более 10
Динамический диапазон, дБ	Более 60
Максимальная частота, МГц	Не менее 5
Неравномерность темнового сигнала (при максимальной частоте), %	Не более 1
Диапазон спектральной чувствительности, нм, по уровню:	
0,1	300 . 1100
0,5	400 . 950

Линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ7. Специализированные ФПЗС с большой высотой апертуры 200 ... 1500 мкм и более весьма перспективны для спектральных измерений. В [62] описан линейный ФПЗС, содержащий 50 элементов с размерами 32×1500 мкм при шаге 32 мкм. ФПЗС типа К1200ЦЛ7 представляет современный прибор второго поколения, по числу элементов и конструктивно-технологическому исполнению аналогичный ФПЗС типа К1200ЦЛ5, но отличающийся высотой апертуры 500 мкм (при том же шаге 13 мкм). Выбранное для прибора соотношение высоты ячейки к шагу обеспечивает работу на частоте до 10 МГц. В [63] указывается, что верхний предел высоты апертуры определен из условия 99%-ного переноса накопленного в фотоячейках заряда в транспортный регистр за время не более 10 % времени считывания строки на максимальной частоте.

Конструкция К1200ЦЛ7 упрощена в сравнении с К1200ЦЛ5 — отсутствуют барьерный и накопительный затворы. Фотодиодная ячейка с такой большой площадью не нуждается в дополнительном МОП-накопителе, а исходный потенциал обеднения фотодиода

Рис. 4.8. Характеристики относительной спектральной чувствительности ФПЗС К1200ЦЛ4



дов задается разрешающим затвором. Двухфазные транспортные регистры с объемным каналом n -типа снабжены двухзатворным входным устройством. Выходное устройство похоже на выходное устройство К1200ЦЛ5, но эффективность преобразования заряда в напряжение у него повышена в результате ужесточения конструктивно-технологических допусков и составляет 4 мкВ/электрон. Отдельные выводы стока транзистора сброса, истока и затворов нагрузочных транзисторов обоих каскадов позволяют оптимизировать выбор рабочей точки и свести к минимуму разбаланс выходных сигналов. Основные параметры К1200ЦЛ7 (изменяются при частоте 2,5 МГц):

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 1,4
Интегральная чувствительность, В/Вт·м ² . . .	Не менее 16
Коэффициент передачи модуляции, % . . .	Не менее 50
Неравномерность выходного сигнала, % . . .	Не более 12,5
Неравномерность темнового сигнала при времени накопления 1 мс, мВ . . .	Не более 30
Квазипиковое напряжение темнового шума, мВ . . .	Не более 2

Линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ4. Он является специализированным спектрозональным прибором, предназначенным для многозональных телевизионных систем [57]. В ФПЗС кристалл, содержащий четыре структуры, аналогичные К1200ЦЛ2, объединен с набором интерференционных фильтров, размещенных на внутренней стороне оптической крышки. ФПЗС работает в четырех спектральных диапазонах: 0,5 ... 0,6 мкм; 0,6 ... 0,7 мкм; 0,5 ... 0,9 мкм; 0,8 ... 0,9 мкм. На рис. 4.8 приведены характеристики относительной спектральной чувствительности К1200ЦЛ4 (штриховой линией показана характеристика базовой структуры без фильтров).

4.2. Параметры матричных ФПЗС

Аналогично линейным матричные ФПЗС можно разделить на приборы общего применения (К1200ЦМ1, К1200ЦМ7, ФПЗС-1М—ФПЗС-4М), предназначенные для телевизионных систем промыш-

ленного и бытового применения, и специализированные, такие, как 1200ЦМ8, используемые для получения межкадровой разности, бескорпусные матрицы серии КБ1200ЦМ3, работающие в режиме временной задержки и накопления.

Матричный ФПЗС типа К1200ЦМ1. Структурная схема и тактовая диаграмма ФПЗС с переносом кадра приведены в гл. 2 (см. рис. 2.14 и 2.15). Матрица работает с поверхностным каналом p -типа, размеры элементов (трехфазной ячейки): 21×27 мкм в секции накопления; 21×21 мкм в секции памяти (хранения). Меньшие размеры элементов в экранированной от света секции хранения выбраны из соображений сокращения площади кристалла (кристалл $7,6 \times 6,4$ мм, область проекции изображения $3,89 \times 4,83$ мм). Каждая секция, а также регистры начинаются электродом третьей фазы и заканчиваются электродом первой фазы. Выходной регистр состоит из 234 элементов, выходное устройство — с плавающей диффузионной областью, включает транзистор сброса и однокаскадный истоковый повторитель. Входной (верхний) регистр с двухзатворным входным устройством позволяет вводить в матрицу электрическим путем фоновый заряд. Дополнительный выходной регистр с идентичным основному выходным устройством обеспечивает подавление тактовых помех.

Основные параметры К1200ЦМ1:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,08
Интегральная чувствительность при времени накопления 20 мс, В/лк	Не менее $3 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент передачи модуляции при проекции 116 ТВ-линий, %	Не менее 30
Неравномерность темнового сигнала, мВ	Не более 2
Пороговая освещенность при времени накопления 20 мс, лк	Не более $5 \cdot 10^{-2}$
Назначение выводов и смещения для К1200 ЦМ1 приведены в [53, 73].	

Ряд дополнительных экспериментальных данных можно найти в работах по применению 1200ЦМ1. В [64] приводятся результаты работы К1200ЦМ-1 с малоконтрастным оптическим изображением. При контрасте $k=0,05$ отношение сигнала к шуму для крупной детали достигало 100. Это означает, что ФПЗС 1200ЦМ-1 позволяет фиксировать изображения с контрастом $k=0,002$. Динамический диапазон при введении 10 %-ного фонового заряда достигал $5 \cdot 10^3$. Плотность темнового тока составляла $3 \dots 30 \text{ нА} \times \text{см}^{-2}$. Охлаждение до -40°C снижает темновой ток на два порядка. Снизить темновой ток в 5...6 раз удастся также путем уменьшения смещений на фазных электродах. По данным [65] ФПЗС К1200ЦМ1 работоспособен при уменьшении смещений на фазах до -2 В (результаты получены при 5 %-ном фоновом заряде на десяти матрицах разных годов выпуска). Оптимизация технологического процесса изготовления К1200ЦМ1 (1986 г.) привела к существенному уменьшению темновых токов: как показано в [66], плотность темнового тока составила $50 \text{ пА} \cdot \text{см}^{-2}$ при комнатной температуре, времени накопления 1 с и смещениях на фа-

зах секций накопления и памяти, равных 12 В. Динамический диапазон таких приборов достигает $2 \cdot 10^4$, значение среднеквадратического отклонения шума, пересчитанное на ячейку, равно 70 электронов. В [67] была определена большая величина среднеквадратического отклонения шума — 220 электронов. По этой цифре дана оценка пороговой освещенности в энергетических единицах $4,7 \cdot 10^{-8}$ Вт·см⁻² при времени накопления 20 мс (принималось, что квантовый выход не ниже 45 %, пороговое отношение сигнала к шуму не хуже 6). При охлаждении ФПЗС К1200ЦМ1 до -170°C , 4 %-ном фоновом заряде и времени накопления 1 с пороговая освещенность снижается до $4 \cdot 10^{-11}$ Вт·см⁻² [67]. Ограничивающими факторами при столь малых темновых токах, характерных для ФПЗС, изготовленных по оптимизированной технологии гетерирования, выступают шумы выходного устройства (емкость узла считывания К1200ЦМ1 равна $0,18 \pm 0,02$ пФ [67]). В [66] детально описано, какими способами снижают наводки, а также исследовано влияние температуры и фонового заряда на шумовые характеристики К1200ЦМ1. Выяснилось, что охлаждение матрицы до -70°C привело к заметному ухудшению эффективности переноса заряда. Введение 1 %-ного фонового заряда улучшило перенос, но шум вырос с 70 до 150 электронов. Авторы делают вывод, что для ФПЗС с поверхностным каналом должно существовать такое значение температуры, при котором обеспечивается минимум шума.

Динамический диапазон сверху ограничен растеканием носителей при локальных пересветках. В К1200ЦМ1 размеры ячеек в секции хранения меньше, чем в секции накопления, и если подавать на фазы секции хранения смещение, большее, чем на фазы секции накопления (т. е. увеличить глубину потенциальных ям), можно примерно в два раза снизить локальное расплывание изображения [65].

Матричный ФПЗС типа К1200ЦМ7 (К1200ЦМ2). Он является полноформатным формирователем видеосигналов, отвечающим по числу строк ТВ-стандарту. Согласно ГОСТ 7845—55 в вещательном стандарте СССР каждое поле изображения разлагается на 312,5 (285,5 активных) строк. Совместимый с ТВ-стандартом ФПЗС должен иметь по вертикали не менее 288 элементов, что позволит, используя чересстрочную развертку, получить разложение передаваемого изображения на 576 активных строк. В ФПЗС К1200ЦМ7 в секциях накопления и памяти содержится по 288 строк. Одна дополнительная строка в каждой секции используется только при переносе. Общее число элементов по вертикали 580, число элементов по горизонтали (в строке) 360. Первоначальный вариант матрицы выпускался, как и К1200ЦМ2, в металлокерамическом корпусе большого размера с тремя юстировочными отверстиями и двухрядным расположением выводов [68]. Впоследствии этот корпус был заменен на более компактный металлокерамический корпус с 32 выводами, планарно расположенными и имеющими шаг 1,25 мм [69]. ФПЗС типа К1200ЦМ7, как и К1200ЦМ1,

трехфазная матрица с переносом кадра, поверхностным каналом p -типа. В отличие от K1200ЦМ1 секции накопления и памяти имеют равные площади: $5,18 \times 6,84$ (по горизонтали) мм^2 . Размеры элемента: 18×19 мкм^2 (по горизонтали), ширина каждого из трех электродов, образующих ячейку, равна 6 мкм , за исключением более широкого электрода последней, третьей фазы секции памяти, замыкающего к выходному регистру.

Матричный ФПЗС K1200ЦМ7 позволяет производить обработку сигнала на кристалле, что значительно расширяет функциональные возможности матрицы. На структурной схеме (рис. 4.9) видно, что матрица снабжена тремя регистрами с устройствами входа — выхода. Регистры 1 и 3 могут использоваться в качестве линий задержки на время строки, причем у независимого регистра 3 время задержки может отличаться от времени строки. Регистр 3, как и в K1200ЦМ1, служит для ввода информации при использовании матрицы в качестве ЗУ с емкостью, равной одному кадру. Одинаковые размеры и конструкция секций накопления и памяти позволяют проецировать изображение на всю поверхность кристалла при работе в малокадровом, ждущем или импульсном режимах. При использовании всего кристалла число элементов разложения по вертикали удваивается, т. е. составляет 1728 строки (чересстрочная развертка, малокадровый режим). Входные устройства с двумя затворами обеспечивают линейный ввод электрических сигналов. Выходные устройства с плавающей диффузионной областью, транзистором сброса и однокаскадным истоковым повторителем. Выходное устройство регистра 2 снабжено аналогичным по топологии компенсационным узлом для подавления тактовых помех. Между входным регистром (регистр 3) и секцией накопления предусмотрен разрешающий затвор, который позволяет одновременно и независимо использовать регистр и матрицу.

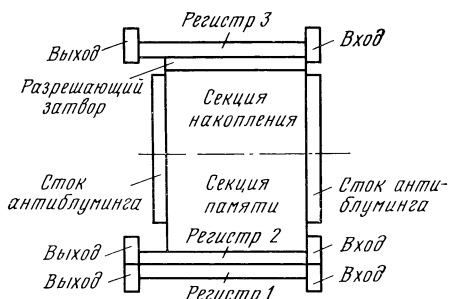
Основные параметры K1200ЦМ7:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,1
Интегральная чувствительность, В/лк . . .	Не менее $1 \cdot 10^{-2}$
Неравномерность интегральной чувствительности, %	Не более 15
Коэффициенты передачи модуляции при проекции	
180 пар ТВ-линий, %	Не менее 35
Неравномерность светового сигнала, %	Не более 12
Число дефектов, шт:	
по всему полю, светлые пятна	20
яркие пятна	3
в центре светлые пятна	2
яркие пятна	—

Светлые столбцы не допускаются в группе K1200ЦМ7А; в группе K1200ЦМ7Б допускается до четырех столбцов по полю, но не в центре.

Спектральная чувствительность у K1200ЦМ7 не отличается от таковой у K1200ЦМ1. Функциональное назначение выводов и смещения K1200ЦМ7 приведены в [53, 73].

Рис. 4.9. Структурная схема матричного ФПЗС К1200ЦМ7 с числом элементов разложения 580×360 (по горизонтали)



Частичный антиблуминг в К1200ЦМ7 осуществляют, как и в К1200ЦЛ1, с помощью расположения соединительных фазных шин, при котором избыточные заряды выносятся на периферию и собираются обратносмещенной областью p^+ -типа (диод антиблуминга).

Матричный ФПЗС К1200ЦМ7 герметизирован крышкой из стекла, подобного применяемому в К1200ЦЛ5, К1200ЦЛ6. На внутренней стороне стекла нанесен светонепроницаемый слой с прямоугольным окном, открывающим секцию накопления. Габаритные размеры ФПЗС — $18 \times 20 \times 4$ мм (без выводов), монтаж возможен в печатную плату либо с помощью контактного устройства УК9-1.

Матричный ФПЗС типа К1200ЦМ15. Трехфазная матрица с кадровым переносом, объемным каналом n -типа, содержит 580×458 (по горизонтали) элементов [70]. Фоточувствительными являются 288×442 элементов секции накопления (рис. 4.10), так как со стороны выхода 12 столбцов матрицы защищены от света для привязки к уровню черного, а с противоположной стороны четыре столбца заканчиваются обратносмещенным диодом, который служит стоком для носителей, попадающих в матрицу с периферии. Первая и последняя строки секции накопления также закрыты светонепроницаемым экраном. В выходном трехфазном регистре содержится 458 элементов, из которых четыре дополнительных элемента, ближайших к выходному устройству, предназначены для считывания уровня темнового тока (во время обратного хода). Выходное устройство — с плавающей диффузионной областью, транзистором сброса и двухкаскадным истоковым повторителем; между каскадами включен транзистор выборки с экранирующими затворами. Входное устройство регистра типовое, двухзатворное.

Для повышения чувствительности в синей части спектра в ячейках секции накопления предусмотрены участки, свободные от покремниевых электродов. Площадь открытого участка составляет около 30 % площади ячейки, что обеспечивает на длине волны 0,4 мкм относительную чувствительность не менее 25 ... 30 % от максимальной спектральной чувствительности. В секции памяти таких участков нет, это позволило сократить площадь кристал-

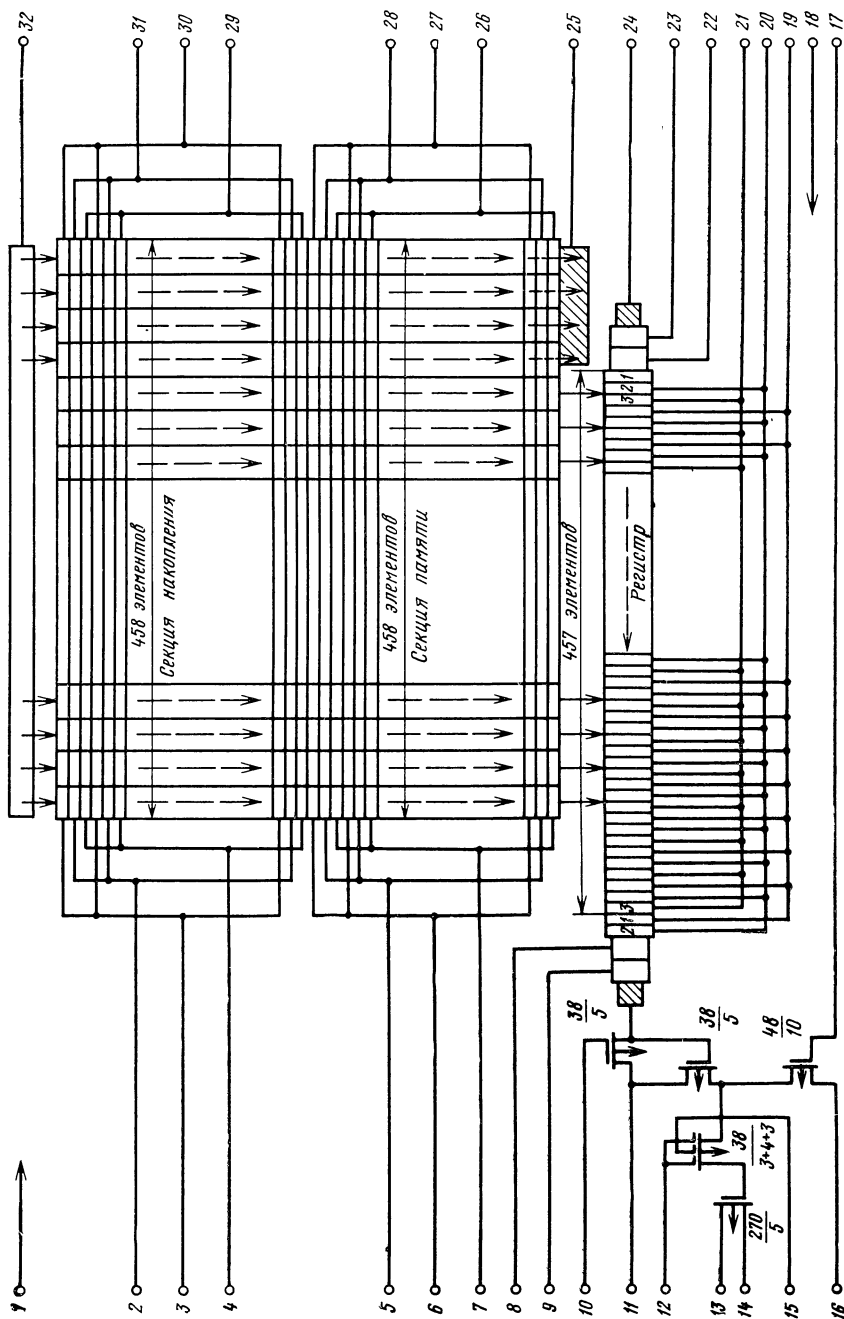


Рис. 4.10. Структурная схема матричного ФПЗС с числом элементов 580×442 (по горизонтали)

ла. Электроды секции накопления и памяти снабжены выводами с обеих сторон для того, чтобы снизить постоянную времени их перезарядки.

Основные параметры ФПЗС К1200ЦМ15:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,2
Коэффициент передачи модуляции на 220 ТВ-линиях, %	Не менее 50
Интегральная чувствительность, В/лк	Не менее $1,5 \cdot 10^{-2}$
Неравномерность выходного сигнала, %	Не более 12

В табл. 4.2 указаны функциональное назначение выводов и рекомендуемые значения смещений.

Матричный ФПЗС К1200ЦМ15 с его повышенной чувствительностью в синей части спектра и высокой эффективностью переноса в объемном канале пригоден для использования в камерах цветного телевидения. Качественное цветное изображение было получено с полосчатыми интерференционными фильтрами (в ос-

Таблица 4.2

Назначение выводов К1200ЦМ15 и смещения

Номер вывода	Назначение	Импульсное смещение, В		Постоян- ное сме- щение, В
		уровень		
		низ- кий	высо- кий	
1, 18	Подложка	—	—	0
2, 31, 32	Вторая фаза секции накопления	2	15	—
3, 30	Первая фаза секции накопления	2	15	—
4, 29	Третья фаза секции накопления	2	15	—
5, 28	Вторая фаза секции хранения	2	15	—
6, 27	Первая фаза секции хранения	2	15	—
7, 26	Третья фаза секции хранения	2	15	—
8	Первый выходной затвор регистра	2	15	—
9	Второй выходной затвор регистра			2
10	Затвор транзистора сброса	—3	5	
11	Сток транзисторов сброса и первого каскада	—	—	17
12	Экран транзистора выборки	—	—	16
13	Сток транзистора второго каскада	—	—	15
14	Выход	—	—	—
15	Затвор транзистора выборки	—	—	15
16	Исток нагрузочного транзистора	—	—	0
17	Затвор нагрузочного транзистора	—	—	—7
19	Первая фаза регистра	—3	12	—
20	Вторая фаза регистра	—3	12	—
21	Третья фаза регистра	—3	12	—
22	Второй входной затвор регистра	—	—	—5
23	Первый входной затвор регистра	—	—	—5
24	Диод входной регистра	—	—	17
25	Диод (сток) четырех столбцов матрицы	—	—	15

Примечания: 1. Все смещения отсчитываются от подложки. 2. На первый выходной затвор регистра подают импульсное смещение третьей фазы регистра. 3. Исток нагрузочного транзистора соединен с подложкой на кристалле.

новых цветах). Конструктивно К1200ЦМ15 оформлен в том же металлокерамическом корпусе, что и К1200ЦМ7.

Матричный ФПЗС типа К1200ЦМ14. Двухфазная строчно-кадровая матрица с числом элементов 577×442 (по горизонтали), объемным каналом n -типа и улучшенной чувствительностью в синей части видимого диапазона [71]. Фотоячейка матрицы представляет МОП-накопитель с поверхностным каналом и очень тонким поликремниевым электродом, из-за чего спектральные характеристики приближаются к фотодиодным. Преимуществом в сравнении с фотодиодом является регулировка смещения независимо от вертикального регистра. Роль разрешающего затвора играет часть фазного электрода вертикального регистра, ограничивающего фотоячейку с одной стороны. С остальных сторон фотоячейку окружает стоп-канал, со стороны, противоположной регистру, располагается также сток антиблуминга. Он выполнен плавающим, включен по схеме емкостного делителя и отслеживает изменение смещения на фотозатворе, т. е. потенциальный барьер между фотоячейкой и стоком антиблуминга сохраняется во всем диапазоне изменения потенциала фотоячейки.

Как показано на структурной схеме ФПЗС (рис. 4.11), на каждый элемент вертикального регистра приходится по две фотоячейки. Считывание информационных пакетов происходит полукадрами, под электроды фаз матрицы Ф1М и Ф2М попеременно. Матрица начинается и оканчивается фазой Ф2М. Объемный канал вертикальных и горизонтальных выходных регистров выполнен методом ионной имплантации донорной примеси до созда-

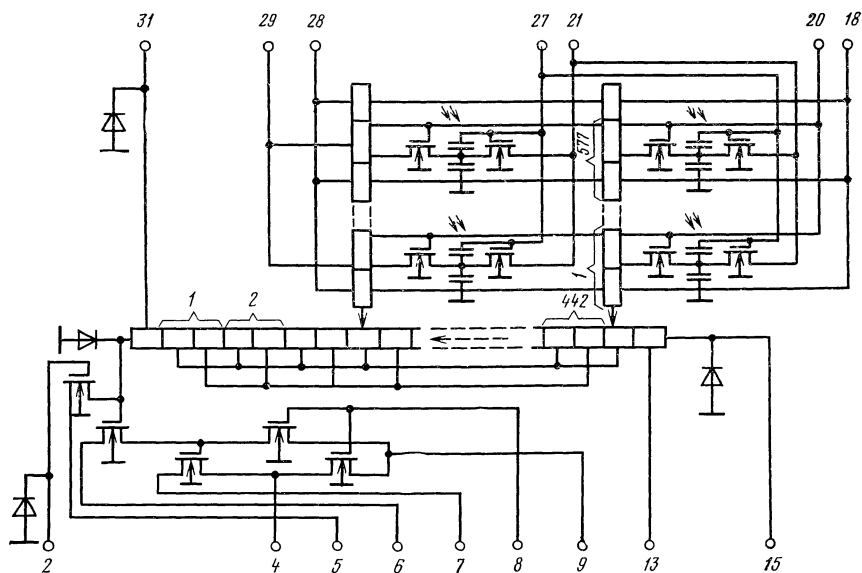


Рис. 4.11. Структурная схема строчно-кадровой матрицы с числом элементов 577×442 (по горизонтали)

ния первого слоя поликремниевых электродов. Встроенные потенциальные барьеры в объемном канале созданы ионной имплантацией акцепторной примеси в зазоры между электродами первого слоя (электроды хранения). Горизонтальный регистр начинается и оканчивается фазой Ф1Р. Считывание зарядов из вертикальных регистров происходит под электроды хранения фазы Ф1Р.

Входное устройство выходного регистра — однозатворное, со встроенным потенциальным барьером, предназначено для проверки функционирования регистра. Выходное устройство — с плавающей диффузионной областью, транзистором сброса и двухкаскадным истоковым повторителем. Объединенные истоки и затворы нагрузочных транзисторов выведены наружу с целью оптимального выбора рабочей точки. С этой же целью разделены и выведены наружу стоки всех транзисторов выходного устройства.

Затворы ФПЗС, имеющие малую емкость и управляемые однопольными напряжениями, снабжены охранными транзисторами, исток которых соединен с затвором. Помимо защиты от статического электричества такие охранные элементы выполняют роль фильтров от наводок и нестабильностей питания.

Основные параметры ФПЗС:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,1
Интегральная чувствительность, В·лк ⁻¹ с ⁻¹ . . .	Не менее 0,9
Коэффициент передачи модуляции, % . . .	Не менее 50
Неравномерность выходного сигнала, % . . .	Не более 20
Неравномерность темнового сигнала, % . . .	Не более 10
Среднеквадратическое напряжение шума, мВ . . .	Не более 0,2
Пороговая экспозиция, лк·с . . .	$3 \cdot 10^{-4}$
Размер фотоячейки, мкм . . .	21,8×12,6 (по горизонтали)
Размер фоточувствительного поля, мм . . .	9,6×7,3 (по горизонтали)

В табл. 4.3 приведены назначение выводов и подаваемые смещения.

Матричный ФПЗС собран в металлокерамическом корпусе типа 4132.32-2 с оптическим окном и 32 выводами, расположенными по длинным сторонам корпуса перпендикулярно основанию.

Матричные ФПЗС-3М. Среднеформатные матрицы, близкие по числу элементов к ФПЗС типа К1200ЦМ1, ранее выпускались как ФПЗС-2М в 48-выводном корпусе с планарными выводами [72].

Современная модификация выпускается в стандартном металлокерамическом корпусе с 24 планарными выводами, имеющими шаг 1,25 мм, и стеклянным оптическим окном.

Матрица содержит 288×256 (по горизонтали) элементов, трехфазная, с поверхностным каналом *p*-типа. Размер секций накопления и памяти 4,3×5,9 мм (по горизонтали). Симметричная конструкция матрицы позволяет использовать в качестве фоточувствительной любую из секций или обе вместе (в малокадровом

Назначение выводов и смещения K1200ЦМ14

Номер вывода	Назначение	Импульсное смеще- ние, В		Постоянное смещение, В
		уровень		
		низкий	высокий	
2	Затвор транзистора сброса	0	3 ... 9	—
4	Выход	—	—	—
5	Сток транзистора сброса	—	—	10 ... 20
6	Сток транзистора первого каскада	—	—	16 ... 20
7	Сток транзистора второго каскада	—	—	16 ... 20
8	Затвор нагрузочных транзисторов	—	—	1 ... 4
9	Исток нагрузочных транзисторов	—	—	1 ... 4
10	Первая фаза выходного регистра	0	15 ... 18	—
11	Вторая фаза выходного регистра	0	15 ... 18	—
13	Входной затвор регистра	—	—	0
15	Входной диод регистра	—	—	9 ... 17
18, 28	Вторая фаза матрицы	2 ... 7	10 ... 13	—
20, 29	Первая фаза матрицы	2 ... 7	10 ... 13	—
21	Сток антиблуминга	—	—	12 ... 20
27	Фотозатвор	1 ... 10	6 ... 18	—
31	Выходной затвор регистра	—	—	3 ... 10

и ждуще-импульсном режимах). Выходной и входной регистры содержат по 264 элемента, снабжены одинаковыми входным и выходным устройствами. В выходном устройстве использован плавающий затвор в сочетании с транзистором сброса и однокаскадным истоковым повторителем.

Основные параметры ФПЗС-3М [73]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,12
Интегральная чувствительность, В/лк	Не менее $3 \cdot 10^{-2}$
Коэффициент передачи модуляции на 100 ТВ-линиях, %	Не менее 40
Неравномерность светового сигнала, %	Не более 10
Неравномерность темнового сигнала, %	Не более 10

Диапазон спектральной чувствительности ФПЗС-3М расширен по сравнению с ФПЗС-2М в сторону коротких волн и составляет 0,4 ... 1 мкм, причем на длине волны 0,4 мкм относительная чувствительность достигает в среднем 20 % от максимума (0,7 ... 0,8 мкм).

Нумерация и назначение выводов ФПЗС-3М, а также рекомендуемые смещения приведены в [73].

В матрицах ФПЗС-3М и во всех матрицах этой серии (ФПЗС-1М, ФПЗС-4М, ФПЗС-5М, ФПЗС-6М) предусмотрено деление на группы по дефектности формируемого ТВ-изображения, площадь которого разбивается на три центрированные неперекрывающиеся зоны с внешними линейными размерами, соответствующими следующим частям полного размера изображения [72]: 30 — зона I,

60 — зона II, 100 — зона III. Допускаемыми дефектами считаются: локальное пятно размером не более чем 3×3 элемента разложения; столбец шириной не более двух элементов разложения; период расположения столбцов не менее восьми элементов.

В соответствии с приведенной методикой матрицы ФПЗС-3М делятся на две группы: ФПЗС-3М — в зоне I дефектов нет, в зоне II не более десяти дефектов; ФПЗС-3М-1 — в зоне I не более пяти дефектов, в зоне II не более 50 дефектов.

В зоне III у обеих групп суммарное число дефектных элементов не должно превышать 5 % общего числа элементов разложения.

Матрицы типа ФПЗС-1М и ФПЗС-4М. Изготовлены по той же технологии с поверхностным каналом p -типа, что и ФПЗС-3М, матрицы ФПЗС-1М и ФПЗС-4М отличаются большим числом элементов, а именно 576×512 (по горизонтали), и предназначены для использования в черно-белой (ФПЗС-1М) и цветной (ФПЗС-4М) аппаратуре, отвечающей требованиям ТВ-стандарта. Матрицы ФПЗС-1М, разработанные раньше, чем ФПЗС-4М [72], имели низкую чувствительность в коротковолновом участке видимого диапазона: около 5 % от максимальной на длине волны 0,4 мкм. Улучшение конструкции матриц ФПЗС-4М позволило повысить относительную чувствительность на длине волны 0,4 мкм до 10 ... 15 % от максимальной, соответствующей 0,8 ... 0,9 мкм. Металлостеклянный 48-выводной корпус у ФПЗС-1М заменен на металлокерамический 32-выводной у ФПЗС-4М. К отличиям в спектральных характеристиках и корпусах следует добавить вдвое большую интегральную чувствительность ФПЗС-4М: $4 \cdot 10^{-2}$ В/лк по сравнению с $2 \cdot 10^{-2}$ В/лк у ФПЗС-1М. Остальные параметры матриц ФПЗС-1М и ФПЗС-4М идентичны [72]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,1
Коэффициент передачи модуляции на 200 ТВ-линиях, % . . .	Не менее 45
Неравномерность светового сигнала, %	Не более 20
Неравномерность темнового сигнала, %	Не более 20

Назначения выводов и значения смещений для матрицы ФПЗС-4М приведены в [73], сведения о матрице ФПЗС-1М — в [72].

В матрицах ФПЗС-1М и ФПЗС-4М число элементов в строке (512) наибольшее по сравнению с другими выпускаемыми матрицами общего назначения. Разработанная в 1979 г. крупноформатная матрица с 580×532 (по горизонтали) элементами разложения хотя и показала хорошие параметры (разрешение до 450 ТВ-линий) и была использована в макете ТВ-камеры для цветного телевидения, в производстве оказалась нерентабельной — при площади кристалла $17,8 \times 14,7$ мм² выход годных был слишком мал. В [74] представлены экспериментальные результаты измерений темнового тока ФПЗС-1М для двух образцов и неравномерности темнового тока в диапазоне температур от -60°C до ком-

натной. Измерение темнового тока производили в произвольно выбранном столбце матрицы, затем вычисляли среднее значение тока и среднеквадратическую неравномерность по 500 элементам. Время накопления изменялось от 100 ... 300 мс до нескольких часов. Экспериментальные данные с хорошей точностью ложатся на теоретические зависимости, методика расчета которых описана в [74]. В этой же работе приведены кривые спектральной чувствительности, измеренные при $-160 \dots +20^\circ\text{C}$, и расчетные значения пороговой облученности. Вызванный охлаждением спад чувствительности в красной области авторы объясняют температурной зависимостью квантового выхода МОП-накопителя (т. е. индуцированного полем p - n -перехода). Расчет пороговой облученности ФПЗС-1М дает значения 10^{-9} и 10^{-11} Вт·см $^{-2}$ для времени накопления 1 с и 100 с соответственно.

Матрицы типа ФПЗС-5М, ФПЗС-6М, ФПЗС-6Л. Специализированные трехфазные матрицы с поверхностным каналом, предназначенные для работы в импульсном режиме освещения. Матрица ФПЗС-5М содержит 288×512 (по горизонтали) элементов, т. е. представляет одну секцию матрицы ФПЗС-4М; ФПЗС-6М содержит 288×256 (по горизонтали) элементов, являясь по числу элементов аналогом матрицы ФПЗС-3М. В обеих матрицах предусмотрено по два регистра с входными двухзатворными устройствами и выходными устройствами с плавающим затвором.

Структурная схема матрицы ФПЗС-5М, назначение выводов и смещения указаны в [73].

Основные параметры ФПЗС-5М [73]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,15
Импульсная чувствительность, В·см 2 /мкДж . . .	Не менее 1
Коэффициент передачи модуляции на 200 ТВ-линиях, %	Не менее 45
Неравномерность темнового сигнала, %	Не более 5
Неравномерность импульсной чувствительности, % . . .	Не более 10
Пороговая экспозиция по флуктуационному шуму, Дж·см $^{-2}$	Не более $2 \cdot 10^{-9}$

В матрицах ФПЗС-5М не допускаются дефекты в зонах I и II (определение зон такое же, как и для ФПЗС-3М); в зоне III допускаются не более шести дефектов, имеющих размер 6×6 фоточувствительных элементов. Для групп ФПЗС-5М-1, ФПЗС-5М-2 допускается большая дефектность, неравномерность темновых токов и чувствительности, а также меньший коэффициент модуляции [73].

Односекционная матрица позволяет также осуществить задержку видеосигнала на 20 мс при полосе 5 МГц, необходимую для двумерной фильтрации и обработки изображения.

В матрицах типа ФПЗС-6М, в отличие от ФПЗС-5М, выведены отдельно стоки, входные затворы и затворы транзисторов сброса верхнего и нижнего регистров. Это расширяет функциональные возможности матриц. Число элементов в регистрах 264.

Основные параметры матриц ФПЗС-6М совпадают с параметрами ФПЗС-5М, отличаясь большей неравномерностью темнового тока (10 вместо 5 %). Дефекты ТВ-изображения нормируются следующим образом: допускается не более 55 дефектов, имеющих вид пятна с размерами, соответствующими площади 3×3 фоточувствительных элементов, и не более четырех светлых или темных столбца шириною в два элемента, отстающих друг от друга не менее чем на десять элементов.

Назначение выводов ФПЗС-6М приведено в [73]; типовые смещения — такие же, как для ФПЗС-5М, за исключением того, что высокий уровень импульсов транзисторов сброса рекомендуется поднять до 35 В. Матрицы ФПЗС-5М и ФПЗС-6М собраны в стандартном 24-выводном металлокерамическом корпусе планарного типа. Оптическое стеклянное окно расположено в центре крышки так, что для засветки открыта вся поверхность кристалла.

Матрица ФПЗС-6Л используется для преобразования в электрический сигнал оптического изображения светового штриха, проецируемого на фоточувствительные поверхности регистров.

Основные параметры ФПЗС-6Л:

Напряжение насыщения выходного сигнала регистров, В	Не менее 2
Допускаемые единичные выбросы выходного сигнала, В	Не более 0,3
Ток утечки через подложку, мкА	Не более 40 мкА

Бескорпусные матрицы серии КБ-1200ЦМЗ. Матрицы работают в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), хотя возможен и кадровый режим, и предназначены для фиксации движущегося изображения. Серия представлена тремя типами матриц с одинаковыми размерами кристалла ($5,36 \times 2,6$ мм) и расположением реперных меток. Матрицы отличаются числом и размером фоточувствительных элементов, кроме того, матрицы КБ1200ЦМ9-3, КБ1200ЦМ10-3 выполнены секционированными. Трехфазные матрицы изготовлены по типовой трехслойной технологии с поверхностным каналом *p*-типа. Числа элементов разложения (первая цифра указывает число элементов в столбцах, т. е. перпендикулярно выходному регистру) равны: КБ1200ЦМ3-3, КБ1200ЦМ4-3 — 32×108 ; КБ1200ЦМ5-3, КБ1200ЦМ6-3 — 64×168 ; КБ1200ЦМ9-3, КБ1200ЦМ10-3 — 128×256 . Размеры элементов соответственно равны: 30×39 , 21×24 и 12×16 мкм; здесь также первая цифра указывает размер в направлении, перпендикулярном регистру (при работе в режиме ВЗН это направление совпадает с направлением движения изображения). Матрицы КБ1200ЦМ3-3, КБ1200ЦМ4-3 и КБ1200ЦМ5-3, КБ1200ЦМ6-3, ранее обозначавшиеся как КБ1201ЦП1-6, КБ1200ЦП2-6 и КБ1201ЦП3-6, КБ1201ЦП4-6 [75], состоят из фоточувствительной матричной секции; компенсирующего выходного регистра для подавления тактовых помех; входного регистра для ввода электрическим путем информации в матричную секцию.

Все регистры снабжены независимыми входными устройствами. Выходные регистры заканчиваются выходным устройством с плавающей диффузионной областью, транзистором сброса и двухкаскадным истоковым повторителем с нагрузочным транзистором в первом каскаде.

Матрицы КБ1200ЦМ9-3, КБ1200ЦМ10-3 имеют иную схемотехническую организацию, позволяющую регулировать чувствительность с помощью подключения (или отключения) разного числа электродов, объединенных в независимые секции, содержащие 16, 16, 32 и 64 электрода. Одна из секций, содержащая 16 электродов и расположенная вблизи выходного регистра, работает постоянно. Подключение остальных секций позволяет задавать число электродов, равное $K \cdot 2^n$, где $K=16$, $n=0; 1; 2$, и соответственно изменять чувствительность в 2; 4 и 8 раз.

Конструктивно матрицы серии КБ1200ЦМ3 представляют держатель из оксидированного алюминия, на который наклеены кристалл и ситалловая плата с контактными площадками для присоединения внешних выводов. Контактные площадки ситалловой платы, в свою очередь, соединены с контактными площадками кристалла тонкими проволочными выводами. Для измерений, испытаний и транспортировки держатель монтируют в тару-спутник с 46 выводами (фотография приведена в [75]).

Бескорпусные матрицы серии КБ1200ЦМ3 собирают в гибридную суперлинейку. Шахматное расположение матриц позволяет избежать потерь изображения, так как фоточувствительные области перекрываются на два столбца. Для того чтобы обеспечить шахматную сборку, матрицы выпускаются парами: в кристаллах КБ1200ЦМ3-3, КБ1200ЦМ5-3 и КБ1200ЦМ9-3 выводы расположены со стороны выходного регистра, а в кристаллах КБ1200ЦМ4-3, КБ1200ЦМ6-3, КБ1200ЦМ10-3 со стороны, противоположной выходному регистру. Следует помнить, что в направлении движения изображения зазоры между фоточувствительными областями остаются. Поэтому для восстановления полного изображения необходимо вводить задержку видеосигналов, поступающих с верхнего ряда матриц, на время, соответствующее времени прохождения зазора между верхним и нижним рядами (см. рис. 2.18,б).

В [76] описан гибридный модуль из 12 матриц КБ1200ЦМ3-3, КБ1200ЦМ4-3 или КБ1200ЦМ5-3, КБ1200ЦМ6-3, представляющий калиброванное по толщине металлическое основание с многослойной керамической коммутационной платой, на которой в шахматном порядке собраны матрицы. Модуль снабжен оптической крышкой из лейкосапфира и герметизован с помощью лазерной сварки. Точность сборки компонентов модуля составляет ± 5 в плане и ± 50 мкм по высоте. Опыт дальнейшей работы показал, впрочем, что целесообразнее применять не готовые модули, а осуществлять потребителю самостоятельно сборку необходимого числа бескорпусных матриц. Основные параметры матриц сведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Параметры ВЗН матриц серии КБ1200ЦМЗ

Параметр	КБ1200 ЦМ		
	3-3, 4-3	5-3, 6-3	9-3, 10-3
Напряжение насыщения выходного сигнала, В	1,2	0,8	0,4
Коэффициент передачи модуляции на половине предельной частоты, %	60	60	60
Неравномерность темнового сигнала, мВ	2	2	1
Максимальная частота работы выходного регистра, МГц	1	1,5	4
Кратность электронной регулировки чувствительности	—	—	2; 4; 8

Примечание. Сопротивление нагрузки 10 кОм.

В табл. 4.5 приведены назначение выводов и смещения для наиболее перспективной пары матриц КБ1200ЦМ9-3 и КБ1200ЦМ10-3.

Матричный ФПЗС типа К1200ЦМ8. Этот специализированный ФПЗС предназначен для формирования межкадровой разности. Межкадровое вычитание заключается в подавлении стационарной части изображения и получении результирующего видеосиг-

Таблица 4.5

Назначение выводов и типовые смещения КБ1200ЦМ9-3 (КБ1200ЦМ10-3)

Номер площадки держателя		Назначение	Импульсное смещение, В		Постоянное смещение, В
КБ1200 ЦМ9-3	КБ1200 ЦМ10-3		уровень		
			низкий	высокий	
1	21	Подложка	—	—	—
2	13	Выходной затвор матрицы	—3	—13	—
3	14	Затвор нагрузочного транзистора	—	—	—5
4	15	Сток выходного транзистора	—	—	—10
5	16	Исток выходного транзистора	—	—	—
6	17	Сток транзистора сброса	—	—	—10
7	18	Первый затвор транзистора сброса	—	—	—13
8	19	Второй затвор транзистора сброса	—	—	—5
10	12	Диод стока	—	—	—
11, 12, 13	1, 2, 3	Первая, вторая, третья фазы регистра	—3	—13	—
14	4	Входной затвор регистра	—	—	—5
15	5	Входной диод регистра	—	—	—5
16, 17, 18	6, 10, 9	Третья, первая, вторая фазы матриц	—3	—13	—
19	7	Третья фаза матричной секции 2	—3	—13	—
20	8	Третья фаза матричной секции 3	—3	—13	—
21	11	Третья фаза матричной секции 4	—3	—13	—

нала, содержащего информацию об изменении изображения в последующем кадре по сравнению с предыдущим. Для решения этой задачи К1200ЦМ8 имеет две идентичные секции по 144×256 элементов, между которыми находится универсальный средний регистр, обеспечивающий перенос зарядов не только вдоль как обычно, но и сквозь регистр, из верхней секции накопления в нижнюю секцию буферной памяти. К секции накопления примыкает входной регистр, секции буферной памяти — выходной регистр. Входной и выходной регистры отделены от матричных секций затворами. Изображение проецируют на секцию накопления, по истечении времени кадра накопленные зарядовые пакеты переносят сквозь универсальный регистр в секцию памяти, где информация хранится, пока в секции накопления формируется следующий кадр. Затем информация обоих кадров выводится одновременно через универсальный (перенос осуществляется вдоль регистра) и выходной регистры. Сигналы регистров сравниваются на внешнем дифференциальном устройстве. Такой режим работы позволяет избавиться от неоднородности темнового тока секции накопления, а также от точечных дефектов секции памяти, если вводить инвертированный темновой сигнал с этой секции в универсальный регистр [77]. Все регистры снабжены двухзатворными входными устройствами. Выходные устройства всех регистров содержат плавающую диффузионную область, транзистор сброса и активный транзистор — истоковый повторитель.

Основные параметры К1200ЦМ8:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В . . .	Не менее 0,25
Монохроматическая чувствительность, $\text{В} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$. . .	Не менее 0,8
Неравномерность чувствительности, %	Не более 3
Коэффициент передачи модуляции, %	Не менее 35
Неравномерность темнового сигнала, %	Не более 1
Коэффициент ослабления вычитаемых кадров (полей)	Не менее 15
Число дефектов изображения по полю:	
светлых пятен	Менее 30
ярких пятен	Менее 3

Монохроматическая чувствительность измеряется при длине волн излучения 0,69 мкм; все параметры приведены для стандартного ТВ-режима (время накопления кадра 20 мс). Специфический параметр — *коэффициент ослабления вычитаемых кадров* (полей) определяется как отношение напряжения выходного сигнала на крупной черно-белой детали первого кадра к разности таких же напряжений второго и первого кадров $K_{\text{ос}} = U_{\text{вых } 1} / (U_{\text{вых } 2} - U_{\text{вых } 1}) = 15$, т. е. достигается ослабление в 15 раз.

В табл. 4.6 приведены функциональное обозначение выводов и смещения.

Все регистры имеют общие фазовые электроды, объединены также первые входные затворы, стоки транзисторов сброса и стоки выходных транзисторов. Матрица собрана в 24-выводном корпусе, таком же, как и для К1200ЦМ-1. Размер фоточувствительной области $3,55 \times 4,62$ мм (по горизонтали), размер элемен-

Назначение выводов К1200ЦМ-8 и смещения

Номер вывода	Назначение	Импульсное смещение, В		Постоянное смещение, В
		уровень		
		низкий	высокий	
1	Второй входной затвор выходного регистра	—	—	—8 ... —20
2	Первая фаза секции памяти	0 ... —8	—8 ... —20	—
3	Первая фаза регистров	0 ... —8	—8 ... —20	—
4	Второй входной затвор среднего регистра	—	—	—8 ... —20
5	Входной диод			
6	Первый входной затвор регистров	0 ... —8	—8 ... —20	—
7, 8	Третья и вторая фазы регистров	0 ... —8	—8 ... —20	—
9, 10, 11	Первая, вторая и третья фазы секции накопления	0 ... —8	—8 ... —20	—
12	Второй входной затвор входного регистра	—	—	—8 ... —20
13	Выход входного регистра	—	—	—
14	Выходной затвор матрицы	0 ... —8	—8 ... —20	—
15	Выходной затвор регистров	—	—	—8 ... —20
16	Выход среднего регистра	—	—	—
17	Сток выходных транзисторов	—	—	—8 ... —20
18	Сток транзисторов сброса	—	—	—8 ... —20
19	Подложка	—	—	+5
20	Затвор транзисторов сброса	0 ... —8	—8 ... —20	—
21	Входной затвор матрицы	0 ... —8	—8 ... —20	—
22, 23	Вторая и третья фазы секции памяти	0 ... —8	—8 ... —20	—
24	Выход выходного регистра	—	—	—

та 24×18 мкм (по горизонтали). ФПЗС К1200ЦМ-8 может работать в малокадровом (время накопления 1 с) и квазивещательном (20 мс) режимах, обеспечивает подавление сигналов стационарного изображения на 40 дБ и уверенную регистрацию движущихся объектов с контрастом 1 : 30 по отношению к стационарному изображению [77].

Матричный ФПЗС типа А1094. Специализированная матрица на 800×800 элементов разложения предназначена для тех областей применения, где требуется количество элементов разложения, превышающее ТВ-стандарт — астрономия, системы точного определения координат объекта и др.

В матрице используется поверхностный канал. Это объясняется не только более простой и хорошо отработанной технологией, но и стремлением сохранить высокую зарядовую емкость, что крайне важно для ТВ-систем, работающих при повышенных фоновых засветках. Благодаря оптимизации процесса геттерирования удалось резко снизить темновые токи и улучшить эффективность переноса (неравномерность темнового тока в отдельных образцах не превышала 1 %).

Два регистра шириной 70 мкм расположены сверху и снизу матрицы и отделены от нее затворами. Регистры снабжены двухзатворными входными устройствами и однокаскадными выходными устройствами с плавающей диффузионной областью. Для улучшения передачи зарядовых пакетов из регистра в плавающую диффузионную область предусмотрены два выходных затвора — тактируемый (аналог ускоряющего электрода в К1200ЦЛ5) и постоянно смещенный, перекрывающийся с плавающей диффузионной областью. Секции матрицы и регистры управляются независимым образом. Прием зарядовых пакетов из матрицы производится под электроды второй фазы регистра, то же самое относится и к вводу электрических сигналов из регистра в матрицу. Собран ФПЗС в охлаждаемом вакуумируемом металлостеклянном корпусе с 64 планарными выводами, по 16 с каждой стороны. Габаритные размеры прибора: диаметр (без выводов) 50 мм; высота 40 мм.

Однокаскадная термобатарея, работающая на эффекте Пельтье, выходит на режим не более чем за 2 мин и обеспечивает перепад 50 °С при токе 1,2 А. Максимальная потребляемая термобатареей мощность 10 Вт, допустимая тепловая нагрузка на холодный спай 0,5 Вт.

В [78] описана работа матрицы в малокадровом режиме. При изменении времени кадра 0,1 ... 10 с, проекции 600 ТВ-линии глубина модуляции составила 30 %. Динамический диапазон достигал 5000.

Охлаждаемое фотоприемное устройство (ФПУ) на базе матрицы ФПЗС-1М [79]. Устройство предназначено для работы в космосе. Кристалл с числом элементов 576×512 смонтирован в массивном (общая масса 170 г) цилиндрическом корпусе с наружной резьбой для крепления в аппаратуре. Входное оптическое окно характеризуется клиновидностью не более 15'', непараллельность поверхностей входного окна и матрицы не более 2'. До температуры —43 ... —38 °С ФПУ охлаждается космическим радиационным теплообменником, соединяемым криогенной тепловой трубой длиной 25 см с хладопроводом, который состоит из внутренней части с хвостовиком и гибкой наружной части (длина 12 см), отходящей под прямым углом к оси ФПУ. Между этими двумя частями включен однокаскадный термоэлектрический холодильник, обеспечивающий перепад 45 °С. Для наземных испытаний ФПУ используют технологический термоохладитель либо теплоаккумулятор, сочленяемые с хвостовиком внутреннего хладопровода. Термоаккумулятор, поглощая специальное веществом (трехводный нитрат лития) тепло, выделяемое горячим спаем термоэлектрического холодильника, позволяет поддерживать в течение 3 ч температуру кристалла не выше —13 °С при температуре корпуса 27 °С.

Основные параметры ФПУ, измеренные при времени накопления 0,4 ... 0,8 с и температуре матрицы 238 К [79]:

Напряжение насыщения выходного сигнала, В	0,2 ... 1,6
Темновой ток (% от сигнала насыщения)	3
Неравномерность темнового сигнала, %	5
Чувствительность, В/лк	1
Неравномерность чувствительности, %	15
Динамический диапазон	500
Коэффициент передачи модуляции на 200 ТВ-линиях, % . . .	50

4.3. Интегральные микросхемы управления

Использование специализированных ИС вместо дискретных приборов и ИС общего назначения позволит заметно снизить массогабаритные показатели аппаратуры, повысить ее надежность. Не следует забывать, что такие ИС разрабатываются под конкретные типы ФПЗС (в особенности это относится к синхрогенераторам), тем самым ограничивается применяемость специализированных ИС. Анализ зарубежных источников показывает, что наиболее оправдана разработка ИС управления для промышленных и бытовых однотипных телекамер, выпускаемых в больших количествах.

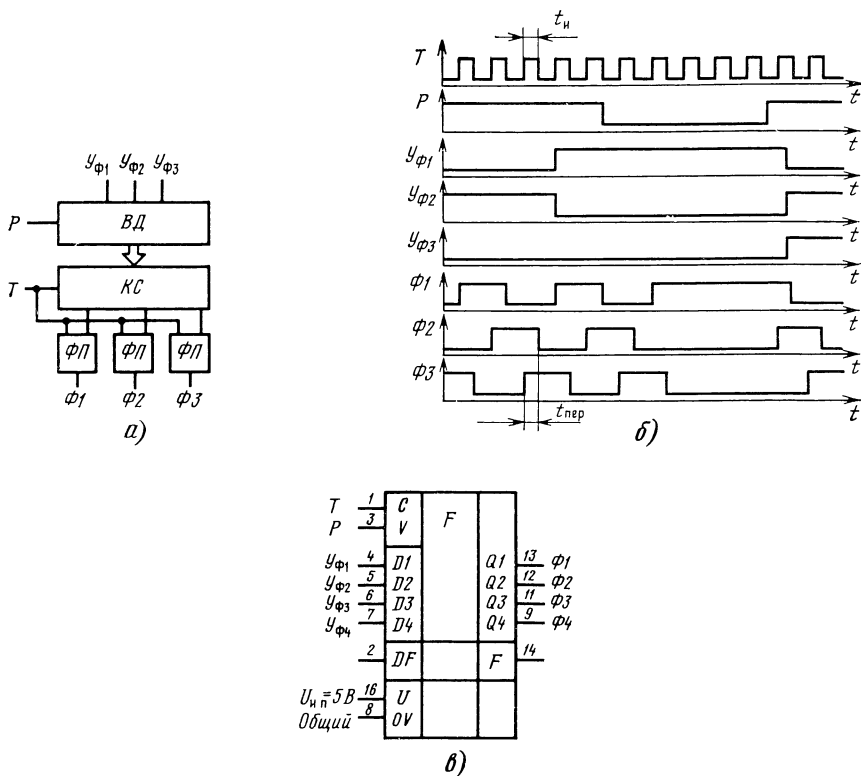


Рис. 4.12. Формирователь фазовых сигналов на основе кольцевого счетчика:
а — структурная схема; б — тактовая диаграмма, в — условное графическое обозначение микросхемы типа К1138АП1

Интегральные микросхемы серии К1138, К1119 на базе биполярных структур с барьерами Шотки. Формирователь фазовых сигналов К1138АП1 выполнен на основе кольцевого счетчика (КС) по структурной схеме, приведенной на рис. 4.12,а. Кольцевой счетчик формирует требуемую последовательность выходных сигналов на фазовых выходах $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$ под действием входных тактовых импульсов Т (см. диаграмму на рис. 4.12,б). На рис. 4.12,а показана схема микросхемы типа К1138АП1Б с тремя выходами, предназначенная для работы с трехфазными ФПЗС, микросхема типа К1138АП1А формирует двухфазные последовательности, микросхема типа К1138АП1В — четырехфазные. В структурную схему входят также формирователи перекрытия $\Phi П$, обеспечивающие необходимое время перекрытия выходных сигналов, и входной дешифратор ВД, который связывает комбинации на внешних входах установка с соответствующими уровнями на триггерах КС. Логическими уровнями установочных входов $у_{\Phi}$ задаются выходные уровни в статическом состоянии. Общий вход разрешения, блокирует установочные входы триггеров при высоком потенциале на нем. При подаче низкого уровня на вход Р происходит установка триггера и выходного состояния формирователя, определенная логическим уровнем на соответствующем входе $у_{\Phi}$. Изменение уровней логических сигналов, задающих статическое состояние, производится на установочных входах между разрешающими установкой импульсами на входе Р. Подробный анализ работы формирователя содержится в [80].

На структурной схеме рис. 4.12,а не показан вспомогательный блок формирования коротких импульсов — одновибратор, который при воздействии на его вход положительных перепадов напряжения (например, с одного из фазовых импульсов) вырабатывает импульсы с амплитудой высокого уровня и длительностью 15—20 нс. Эти импульсы могут быть использованы для управления транзистором сброса или в качестве тактовых последовательностей для запуска других формирователей типа К1138АП1.

Основные параметры микросхемы К1138АП1:

Выходное напряжение, В:	
низкий уровень	Не более 0,4
высокий уровень	Не менее 2,9
Входной ток низкого уровня, мА:	
тактовый вход	Не более 2,7
вспомогательный вход	0,55
входы установки	0,3
Входной ток высокого уровня, соответственно, мкА	
Ток потребления, мкА	50; 0,01; 0,01
Время задержки при включении (выключении), нс	20 (А), 30 (Б), 40 (В)
Время перехода при включении (выключении), нс	Не более 15
Время перекрытия выходных импульсов, нс	Не более 6
Максимальная частота выходных сигналов, МГц	Не менее 10
	Не менее 20 (А), 13 (Б), 10 (В)

На рис. 4.12,в приведено условное графическое обозначение К1138АП1: 1 — тактовый вход; 2 — вход вспомогательного блока; 3 — вход разрешения установки; 4—7 — входы установки выходного уровня 1—4 фазы; 8 — общий вывод; 10—13 — выходы 4—1 фазы; 14 — выход вспомогательного блока; 16 — питание.

Преобразователи уровней К1119ПУ1 — ПУ3. Они обеспечивают преобразование входных сигналов ТТЛ- и КМОП-уровней в управляющие сигналы, подаваемые непосредственно на ФПЗС. Интегральные микросхемы К1119ПУ1 и К1119ПУ2 — быстродействующие (7,5 и 10 МГц) четырехканальные двухуровневые преобразователи, работающие на емкостные нагрузки 300 и 250 пФ, К1119ПУ3 — трехканальный четырехуровневый преобразователь, который при меньшей частоте (1 МГц) может работать на емкостную нагрузку до 5000 пФ. На рис. 4.13,а показана структурная схема К1119ПУ1, 2, включающая четыре блока преобразователей ПУ1 — ПУ4. В каждом ПУ содержится усилитель мощности УМ и блок согласования с источниками входных уровней БС. Блок задания и регулировки режима БР является общим для всех ПУ. Преобразователь ПУ1 имеет независимое питание, ПУ2 — ПУ4 питаются от общего источника. У всех четырех ПУ синхронно регулируются такие параметры, как время нарастания t_n и спада t_{cn} выходных импульсов, а также потребляемая мощность $P_{пот}$.

На рис. 4.13,б приведены условное графическое изображение микросхемы и основной вариант включения, например для управления фазами трехфазного регистра и транзистором сброса. Назначение выводов (К1119ПУ2) следующее: 1, 3 — питание высокого и низкого уровней ПУ1; 9, 14 — питание высокого и низкого уровней ПУ2 — ПУ4; 2, 4 — вход и выход ПУ1;

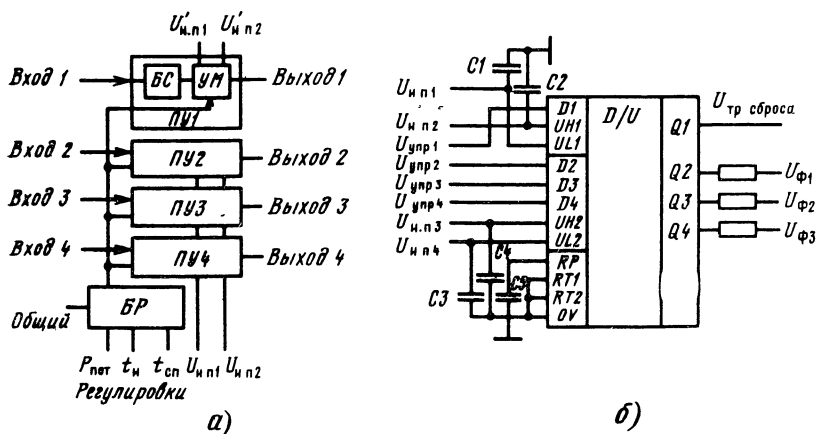


Рис. 4.13. Интегральная микросхема преобразователя уровня К1119ПУ1, 2: а — структурная схема, б — условное графическое обозначение

5 — подключение резистора регулировки времени нарастания; 6, 7 — вход и выход ПУ2; 8 — общий вывод; 10, 11 — выход и вход ПУ3; 12 — подключение резистора регулировки потребляемой мощности; 13, 15 — вход и выход ПУ4; 16 — подключение резистора регулировки времени спада.

Конденсаторы $C1$ — $C4$ на схеме рис. 4.13,б шунтируют источники питания, их емкости должны быть много больше емкостей нагрузки; $C5$ (более 1000 пФ) — корректирующий конденсатор. Резисторы в выходных цепях (5 ... 20 Ом) устраняют колебательные выбросы, возникающие из-за индуктивностей выводов и монтажа. Наибольшее быстродействие достигается при соединении выводов $RT1$ и $RT2$ с общим выводом. Если между выводом $RT1$ и общим включить регулировочный резистор, увеличивается время нарастания, а при включении резистора между $RT2$ и общим возрастает время спада выходных импульсов. При включении резистора между выводом RP и общим снижается потребляемая мощность (и падает быстродействие). Более подробные сведения о К1119ПУ1, 2 в [81].

В табл. 4.7 приводятся типовые значения параметров К1119ПУ1, 2.

Структурная схема К1119ПУ3 приведена на рис. 4.14,а. Она включает три четырехуровневых преобразователя ПУ1—ПУ3 и блок управления БУ, имеет два общих для всех ПУ входов управления и две общие регулировки потребляемой мощности, предназначена для управления секциями накопления и памяти p -канальных матричных ФПЗС с переносом кадра. Два низких выходных уровня задаются источниками питания $U_{нп1}$, $U_{нп2}$, два высоких — источниками $U_{нп3}$, $U_{нп4}$ (общими для всех ПУ). Входной сигнал преобразователя $U_{вх}$ на одном из входов 1; 2; 3 осуществляет вы-

Таблица 4.7

Типовые значения параметров К1119ПУ1 К1119ПУ2

Параметр	К1119ПУ1	К1119ПУ2
Выходное регулируемое напряжение, В		
высокого уровня	10,4 ... 23,4	5,4 ... 23,4
низкого уровня	0,3 ... 8,3	0,3 ... 10,3
Статический ток потребления от первого источника питания (при 24 В), мА	75	±0
Входной ток:		
высокого уровня, мкА	0,1	0,1
низкого уровня, мА	2	0,1
Время задержки включения (выключения), нс	22	22
Время нарастания (спада), нс	18	15

Примечания: 1. Динамические параметры приведены для К1119 ПУ1 при частоте 7,5 МГц и емкости нагрузки 300 пФ, К1119ПУ2 — при 10 МГц и 250 пФ. 2. ИС выпускаются двух типономиналов: для напряжения питания до 23 В (А) и до 17 В (Б). 3. Время нарастания (спада) определяется по уровням 0,1 и 0,9 соответствующего приращения напряжения.

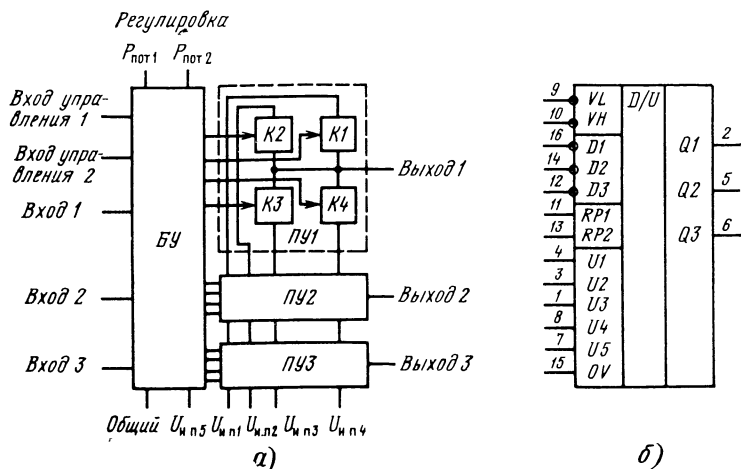


Рис. 4.14. Интегральная микросхема с преобразователя уровня К1119ПУ3: а — структурная схема; б — условное графическое обозначение

борку одного уровня из двух низких или двух высоких уровней. При этом низкий уровень обеспечивается входом управления 1, высокий уровень — входом управления 2. Например, при $U_{ВХ}=0$ сигнал со входа управления 1 устанавливает на выходе один из двух низких уровней, а при $U_{ВХ}=1$ сигнал со входа управления 2 — один из двух высоких уровней. Низкие уровни служат для поддержания на фазах секций накопления режима обогащения или для осуществления режима выталкивания заряда из потенциальной ямы при переносе; высокие уровни используются для накопления и переноса.

На рис. 4.14,б дано условное графическое обозначение К1119ПУ3 с нумерацией выводов: 1, 3, 4, 8 — питание 3, 2, 1 и 4-го уровней соответственно; 2, 5, 6 — выходы ПУ1, 2, 3; 7 — питание +5 В; 9 — первый вход управления (выборка одного из двух низких уровней); 10 — второй вход управления (выборка одного из двух высоких уровней); 11, 13 — подключение резисторов регулировки потребляемой мощности; 12, 14, 16 — входы ПУ3, 2, 1; 15 — общий вывод.

Основные типовые параметры К1119ПУ3:

Выходное регулируемое напряжение, В:

первого уровня	4,2 . . . 4,7
второго уровня	0,2 ... —9,8
третьего уровня	—9,5 .. —22,5
четвертого уровня	—10 ... —25,2

Потребляемая мощность, мВт:

без ВЧ заполнения	200
с ВЧ заполнением	700

Входной ток низкого уровня, мА:

по выводам 9, 10	0,2
по выводам 12; 14; 16	0,7

Входной ток высокого уровня, мкА:

по выводам 10; 12; 14; 16	0,1
по выводу 9	40
Время задержки включения (выключения), нс	55 (50)
Время перехода между уровнями, нс:	
первым и вторым, третьим и четвертым	100
со второго на четвертый	90
с четвертого на второй	100

Значение потребляемой мощности указано для емкости нагрузки 5000 пФ, частоты ВЧ заполнения 1 МГц, периода повторения серий импульсов ВЧ заполнения 20 мс и числа импульсов в серии 1000. Более подробные сведения о К1119ПУЗ содержатся в [82].

Многофункциональные БИС серии К1124 на базе КМОП-структур. БИС типов К1124АП1 и К1124АП2 относятся к многофункциональным БИС, разработанным для управления трехфазными матричными ФПЗС с переносом кадра. Разработанный первый вариант БИС предназначался для управления матрицей К1200ЦМ1 и позволил создать миниатюрную ТВ-камеру ($45 \times 38 \times 15$ мм, масса — 50 г) для систем промышленного телевидения.

Дальнейшее развитие идеи формирователя фазовых сигналов на КМОП-структурах привело к созданию БИС К1124АП1 и К1124АП2 с широкими функциональными возможностями. Например, БИС К1124АП2 выполняет следующие функции формирования [83]:

последовательностей тактовых импульсов для управления трехфазными ФПЗС с переносом кадра типа К1200ЦМ7 с числом элементов 580×380 (по горизонтали), типа К1200ЦМ1 с числом элементов 288×232 (по горизонтали); возможна перестройка на режимы управления матрицами с числом строк 576 и числом элементов в строке, отличающимся от 360, а также на режимы — малокадровый, ждущий, с суммированием нескольких строк, памяти на кадр;

служебных импульсов для ТВ-систем прикладного назначения: привязки к уровню черного, отметки четности поля, центров поля и строк и др.;

синхро-, гасящих и уравнивающих импульсов с временными характеристиками по ГОСТ 7845—79 системы вещательного телевидения.

На рис. 4.15 приведено графическое обозначение БИС К1124АП2. Эта БИС формирует трехфазные импульсы с частотой 7 МГц из входных тактовых парафазных импульсов частотой 21 МГц, подаваемых на входы T (вывод 11) и \bar{T} (вывод 13). Возможен запуск и от однофазного тактового сигнала, который подается на вход 13 и преобразуется затем в парафазный; БИС также может самостоятельно формировать парафазные импульсы при подключении кварцевого резонатора. Если входы T и \bar{T} подключить к плюсовому выводу источника питания, БИС работает в автоколебательном режиме; частота регулируется изменением напряжения питания и стабилизируется внешним синхросигналом

нужной частоты, поданным на вход синхронизации C (вывод 9). Для перевода в малокадровый режим на входы T и \bar{T} подают парафазные импульсы любой частоты ниже 21 МГц, при этом длительности формируемых импульсов пропорционально увеличиваются, а их соотношения не изменяются.

Многофункциональная БИС позволяет останавливать функционирование в определенном состоянии формируемых временных диаграмм, а именно соответствующем положению электронного луча на экране ВКУ в начале первого поля. Помимо упомянутых выходов, с которых снимаются фазовые импульсы управления, БИС содержит служебные выходы; вывод 40 — импульсы гашения полей кадра ГП; вывод 32 — импульсы гашения строк ГС; вывод 37 — смесь гасящих импульсов строк и полей кадра СМГ; вывод 30 — смесь синхронизирующих и уравнивающих импульсов строк и полей приемника СМС; вывод 27 — импульсы уровня черного ФУЧ в конце строки во время вывода двенадцати неинформационных пакетов из регистра; вывод 2 — импульсы, отмечающие четность поля ЧП; вывод 25 — импульсы половинной строчной частоты ПСЧ; вывод 35 — импульсы, отмечающие центр строк ЦС; вывод 34 — импульсы, отмечающие центр поля ЦП; вывод 38 — импульсы управления потенциалом накопления УН.

Служебные импульсы для телевизионных систем обеспечивают:

фиксацию уровня черного в видеоусилителе в конце строки (во время вывода 12 неинформационных зарядовых пакетов);

определение ЧП (низкое значение уровня сигнала ЧП соответствует первому полю, высокое значение — второму полю, моменты спада и нарастания импульсов ЧП соответствуют моментам смены полей);

установление четности строки и четности кадра посредством формирования сигналов ПСЧ (низкое значение уровня сигнала ПСЧ в начале первого поля может соответствовать для определенности, началу нечетного кадра, высокое значение — началу четного кадра, моменты смены уровней сигнала ПСЧ соответствуют фронту строчного ГС);

определение момента, соответствующего середине прямого хода луча по строке (определение ЦС), по моменту спада импульсов ЦС;

определение момента, соответствующего середине прямого хода луча по полю, дополнительно сдвинутого до середины прямо-

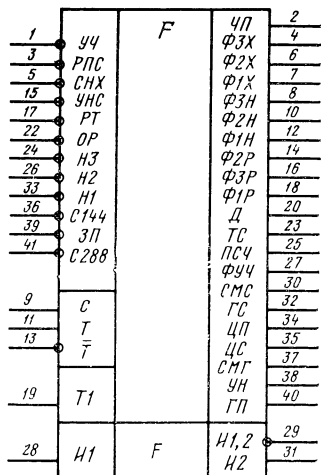


Рис 4.15. Условное графическое изображение микросхемы синхрогенератора K1124АП2

го хода луча по строке (определение ЦП), по моменту спада импульсов ЦП;

определение момента изменения потенциала фазных электродов секции накопления СН, под которыми происходит процесс накопления заряда с целью увеличения динамического диапазона освещенности, воспринимаемой ФПЗС, в сторону белого.

Многофункциональная БИС содержит управляющие входы: входы Н1 (вывод 33), Н2 (вывод 26) и Н3 (вывод 24) управляют режимами накопления СН. В основном режиме на все три вывода подают высокий уровень напряжения, и тогда накопление осуществляется под первой фазой в первом поле кадра и под второй фазой во втором поле кадра (режим 1/2). Если изменить уровень на низкий на выводе 24, накопление произойдет под вторыми фазами, на выводе 26 — под первыми фазами, на выводе 33 — под первой фазой в первом поле и под второй и третьей во втором поле;

вход УЧ (вывод 1) позволяет при подаче низкого уровня напряжения уменьшить вдвое частоту импульсов переноса из СН в СХ (время переноса 288 зарядовых пакетов возрастает с (493 ± 1) мкс до (986 ± 1) мкс);

вход РПС (вывод 3) разрешает перенос строк внутри СН, а вход ЗП (вывод 39) запрещает перенос из СН в СХ. Такой запрет позволяет осуществить длительное накопление при одновременном формировании стандартных импульсов гашения и синхронизации. Запрет можно также обеспечить подачей на вход ЗП инвертированных импульсов гашения полей кадра — каждый из них запретит в очередном поле кадра перенос из СН в СХ;

при подаче на вход С288 (вывод 41) низкого уровня напряжения на выходах фаз СН и СХ формируются не 290, а 288 импульсов (импульсы 2, 3 в первом поле и 314, 315 во втором поле кадра не формируются); вход С144 СНХ (вывод 5) осуществляет работу в ждущем режиме (без образования потенциальных ям под фазными электродами) при подаче на него низкого уровня напряжения. После снятия низкого уровня электроды СН и СХ готовы к накоплению и хранению; потенциальные ямы, возникающие под ними, будут свободны от термически генерированных носителей;

вход ОР (вывод 22) организует прием первой фазой регистра зарядов из СХ (при низком уровне на ОР устанавливаются высокий уровень напряжения на первой и низкий — на второй и третьей фазах регистра);

вход УНС (вывод 15) устанавливает БИС и управляемую ею матрицу в начале первого поля при подаче низкого уровня напряжения; это облегчает работу в ждущем режиме и позволяет параллельно управлять несколькими ФПЗС. Подача на УНС высокого уровня вновь запускает БИС.

Выпускается БИС К1124АП2 в 42-выводном металлокерамическом корпусе, вывод 42 — общий, вывод 21 — питание (плюс).

Основные параметры БИС К1124ПА2:

Напряжение питания, В	$12 \pm 10\%$ (в нестандартных режимах допустимо уменьшение до 6)
Потребление в статическом состоянии, мкА	Не более 10
Потребление в динамическом состоянии при частоте входного сигнала 21 МГц, мА	Не более 50
Емкостная нагрузка на всех входах, пФ	Не более 20

Временные диаграммы, формируемые БИС, и детальное описание ее работы приведены в [83].

Дальнейшее расширение функциональных возможностей наблюдается в КМОП БИС, предназначенной для управления ФПЗС с числом элементов 576×440 (по горизонтали) [70] и обеспечения ее работы в видеокамерах системы SECAM цветного телевидения. Микросхема включает блоки, близкие к блокам К1124АП2: формирователи трехфазных импульсов и импульсов управления регистром; блок делителей частоты; схему останова БИС; блок управления режимами работы СН и СХ, формирователи импульсов для СН и СХ; формирователи служебных импульсов. Основные отличия от К1124АП2 обусловлены особенностями ФПЗС и спецификой формирования цветного изображения: добавлены выход ВБ, с которого подаются импульсы на затвор транзистора выборки, и выход импульсов частотой 4,25 МГц, равняющейся частоте покоя синей поднесущей; введены блок формирования импульсов выборки цвета; схема временной задержки на 0,8 мкс импульсов, подаваемых на вход ЗИ; схема временной задержки импульсов синхросмеси; делитель на 564, используемый для синтеза цветовой поднесущей 4406,25 кГц.

Для запуска БИС на входы T и \bar{T} подают парафазные импульсы частотой 25,5 МГц; возможна работа в автоколебательном режиме со стабилизацией импульсами частотой 8,5 МГц, подаваемыми на вход синхронизации C . Основной режим накопления: под первой фазой в первом поле и под третьей во втором поле; режим $(1/3)$ обеспечивает лучшее разрешение, чем режим накопления под одинаковыми фазами. Микросхема может работать также в режимах $1/1$, $3/3$ $(1+2)/(2+3)$; в последнем случае повышается чувствительность в синем. Смена режимов накопления осуществляется изменением смещений на входах $H1$, $H2$, $H3$. Вход $УЧ$ позволяет удвоить частоту переноса из СН в СХ по сравнению с номинальной (354 кГц). Микросхема останавливается в начале первого поля при подаче высокого уровня напряжения на вход ОНС в случае запуска импульсами частотой 25,5 МГц и при работе в автоколебательном режиме или на вход ОНС 1 в случае запуска тактовыми импульсами частотой 2,125 МГц. При подаче на тактовый вход $T1$ импульсов частотой 2,125 МГц и на вход РТ низкого уровня напряжения БИС формирует следующие служебные импульсы:

9	РСМС	F	ВЦ(Г)	1
13	ЗН		СЦ	2
26	УЧ		ВЦ(Р)	3
27	НЗ		ГС	5
28	РТ		СМС(Г)	6
30	НЗ		СМГ	7
43	Н1		ГП	8
46	ОНС		ЗН(Г)	11
48	ОНС1		СМС	14
			ЦП	15
			ЧК	16
			СС	17
			ЦС	18
			ПЧ	19
			ЧП	20
			ГЦ	21
			ПЧМ	22
		D564	Ф1Н	23
			Ф2Н	25
			Ф3Х	31
			1,0625	32
			Ф2Х	33
			Ф3Н	34
			Ф1Х	35
			4,25	38
			ВВ	37
			ТВ	38
42	Г		Ф3Р	39
44	Г		Ф1Р	40
45	С		Ф2Р	41
29	Г1		ВЦ(В)	47
10	Г2			12

Рис. 4.16. Условное графическое изображение микросхемы синхрогенератора в системе цветного телевидения

ных кадров и первом — четных, используются для управления коммутатором в схеме матрицирования;

импульсы центра строки (ЦС) и поля (ЦП), четности поля (ЧП) и кадра (ЧК).

Условное графическое обозначение показано на рис. 4.16.

Назначение и нумерация выводов БИС для управления ФПЗС в системе цветного телевидения:

Вывод	Обозначение	Функциональное назначение
1	ВЦ (G)	Выход импульсов выборки зеленой (G) составляющей цвета
2	СЦ	Выход импульсов синхронизации цвета
3	ВЦ (R)	Выход импульсов выборки красной (R) составляющей цвета
4	—	Общий
5	ГС	Выход гасящих импульсов строк
6	СМС (τ)	Выход схемы задержки смеси синхронизирующих импульсов на время $\tau \leq 0,8$ мкс
7	СМГ	Выход смеси гасящих импульсов
8	ГП	Выход гасящих импульсов полей

гасящие импульсы строк (ГС) и полей (ГП), смесь гасящих импульсов (МГ), импульсы гашения сигнала цветности (ГСЦ);

синхроимпульсы строк (СС) и смесь синхроимпульсов (СМС); на входе СМС импульсы синхросмеси задерживаются до 0,8 мкс при подключении переменных сопротивления и емкости к входу РСМС;

импульсы синхронизации цвета (СЦ), представляющие серию из 9 импульсов положительной полярности длительностью $(52 \pm 0,3)$ мкс и обеспечивающие включение цветовой синхронизации в строках 7,5 и 320—328;

импульсы половинной строчной частоты меандровой формы (ПЧМ), 7812,5 Гц — используются в качестве опорной в синтезаторе цветовой поднесущей красной;

импульсы половинной строчной частоты (ПЧ), отличаются от ПЧМ перевернутой фазы импульсов во втором поле нечетных;

9	PCMC	Вход для регулирования величины τ временной задержки смеси синхронизирующих импульсов
10	T2	Вход тактовых импульсов для деления на 564
11	3И (τ_1)	Выход схемы задержки входных импульсов на время $\tau_1=0,8$ мкс
12	Д564	Выход делителя на 564
13	3И	Вход схемы временной задержки входных импульсов
14	СМС	Выход смеси синхронизирующих импульсов
15	ЦП	Выход импульсов, отмечающих центр поля
16	ЧК	Выход импульсов четности кадра
17	СС	Выход синхронизирующих импульсов строк
18	ЦС	Выход импульсов, отмечающих центр строки
19	ПСЧ	Выход импульсов половинной строчной частоты для коммутатора схемы матрицирования кодера
20	ЧП	Выход импульсов четности поля
21	ГСЦ	Выход импульсов гашения сигнала цветности
22	ПСЧМ	Выход импульсов половинной строчной частоты, меандр
23	Ф1Н	Выход тактовых импульсов для первой фазы СН
24	+	Питание
25	Ф2Н	Выход тактовых импульсов для второй фазы СН
26	УЧ	Вход удвоения частоты импульсов для переноса заряда из СН в СХ
27	НЗ	Вход разрешения накопления заряда в режиме 3/3
28	РТ	Вход разрешения подачи тактовых импульсов 2,125 МГц
29	T1	Вход тактовых импульсов 2,125 МГц
30	Н2	Вход разрешения накопления заряда в режиме 1/1
31	Ф3Х	Выход тактовых импульсов для третьей фазы СХ
32	1,0625	Выход тактовых импульсов для второй фазы СХ
33	Ф2Х	Выход импульсов частотой 1,0625 МГц
34	Ф3Н	Выход тактовых импульсов для третьей фазы СН
35	Ф1Х	Выход тактовых импульсов для первой фазы СХ
36	4,25	Выход импульсов частотой 4,25 МГц
37	ВХ	Выход импульсов выборки хранения
38	ТВ	Выход импульсов управления транзистором сброса
39	ФЗР	Выход тактовых импульсов для третьей фазы регистра
40	Ф1Р	Выход тактовых импульсов для второй фазы регистра
41	Ф2Р	Выход тактовых импульсов для второй фазы регистра
42	T	Вход тактовый инверсный
43	Н1	Вход разрешения накопления заряда в режиме 1+2/2+3
44	T	Вход тактовый прямой
45	С	Вход внешней синхронизации
46	ОНС	Вход останова БИС в начале первого поля при запуске по входам Т и Т1 или в автоколебательном режиме
47	ВЦ (В)	Выход импульсов выборки синей (В) составляющей цвета
48	ОНС1	Вход останова БИС в начале первого поля при запуске по входу Т1 (2,125 МГц)

По потреблению и напряжению питания БИС не отличается от К1124АП2. Следует подчеркнуть, что обе БИС не имеют зарубежных аналогов.

Интегральные микросхемы типа К1124ПУ1. Эти микросхемы выполнены по типовой КМОП-технологии и являются двух-, че-

тырехуровневыми преобразователями с каскадным соединением ключей. В них входят три четырехуровневых преобразователя и шесть двухуровневых. Входы U_1, U_2, U_3, U_4 — OU (OU — общий вывод с нулевым потенциалом) предназначены для задания четырех уровней смещения от внешних источников питания; на входе U_5 задается смещение 5 В. Входы управления преобразователями: D_1 — D_3 — четырехуровневыми, D_4 — D_9 —двухуровневыми. Входы выбора уровней: UL — нижнего (U_3, OU), UH — верхнего (U_1, U_2). Выходами являются Q_1 — Q_3 — четырехуровневых, Q_4 — Q_9 — двухуровневых преобразователей; на выходе формируются положительные импульсы, т. е. непосредственно от микросхем осуществляют управление ФПЗС с каналом n -типа. Для управления p -канальными ФПЗС можно сместить подложку (общий вывод) в область положительных напряжений 12 ... 15 В. При этом следует поменять местами управление входами выбора уровней UL и UH (поскольку они меняются функциями) и инвертировать сигналы, подаваемые на входы D_1 — D_3 .

Основные параметры K1124ПУ1:

Напряжения источников питания уровней,
В:

первого (U_{cc1})	. . . . .	9 ... 15,5
второго (U_{cc2})	. . . . .	9 ... U_{cc1}
третьего (U_{cc3})	. . . . .	0 (U —5)
четвертого (U_{cc4})	. . . . .	4,5 ... U_{cc1}

Статический ток потребления, мА Не более 0,1

Ток потребления в динамическом режиме при частоте 3 МГц и емкости нагрузки 100 пФ, мА Не более 33

Входное напряжение, В, уровня:

низкого	. . . . .	—0,2 . 0,4
высокого	. . . . .	4,5 . (U_{cc4} —1) ... $U_{ип5}$

Времена, нс:

задержки включения (выключения)	. . . . .	Не более 100
нарастания фронта и спада выходного импульса на нагрузках 100 и 2000 пФ	. . . . .	Не более 50 и 400

Частота входного напряжения, МГц, на нагрузках 100 и 2000 пФ Не более 5 и 0,5

Потребляемая мощность Не более 0,5 Вт

Источники питания U_1 — U_4 задают выходные уровни $U_{ВУ2} \geq U_{ВУ1} \geq U_{НУ2} \geq U_{НУ1} = 0$, так что U_1 задает $U_{ВУ2}$, U_2 — $U_{ВУ1}$ и т. д. Необходимо соблюдать последовательность включения и выключения источников питания: включают вначале U_1 , затем остальные в любой последовательности; выключают в обратном порядке. Для управления сигналами ТТЛ-уровней между каждым из входов и шиной питания 5 В необходимо подключить сопротивление 15 кОм.

Переключательные характеристики при переходах с уровня на уровень являются инвертирующими при передаче на выход приращений со входов выбора уровней UL и UH и неинвертирующими при использовании входов D_1 — D_3 . Погрешность задания вы-

ходного уровня может достигать 1 В (относительно соответствующего напряжения источника питания) из-за падения напряжения на двух последовательно включенных МОП-транзисторах — выходном ключе каскада выбора уровня и выходном ключе основного каскада.

Двухуровневые преобразователи микросхем по временным параметрам не отличаются от четырехуровневых. Выходные уровни двухуровневых преобразователей задаются напряжениями на входах U_2 и U_4 .

Глава 5

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

5.1. Устройства управления ФПЗС и обработки видеосигнала

Устройства управления ФПЗС, следуя фундаментальной работе [84], можно разделить на два основных класса: с *фиксированным* и *перестраиваемым* алгоритмами работы. Устройства управления с фиксированным алгоритмом работы проще, однако их применение ограничено заданным типом ФПЗС (формат матрицы, способ накопления-считывания и т. д.). В перестраиваемых устройствах изменение алгоритма осуществляется коммутацией дополнительных блоков с помощью ЭВМ (микропроцессоров), вырабатывающих команды изменения режимов работы ФПЗС. Схема управления усложняется, но становится универсальной.

Хорошим компромиссным решением является БИС управления К1124 АП2 (см. гл. 4), в которой предусмотрены изменение формата матрицы и широкий выбор режимов работы.

В любом случае решаемые задачи однотипны и сводятся к следующим:

- обеспечению накопления информации, т. е. установлению некоторого распределения смещений на электродах ФПЗС (не только секции накопления);

- переносу накопленных зарядовых пакетов посредством формирования управляющих импульсов;

- вводу (и выводу) информации;

- согласованию управляющих импульсов с ФПЗС по амплитудам, длительностям и фронтам, т. е. преобразованию уровней;

- добавлению служебных импульсов (привязка к уровню, выбор поля и др.);

- синхронизации управляющих и служебных импульсов.

Реализация задач осуществляется с помощью блоков модулей (рис. 5.1): генератора тактовой частоты $ГТЧ$; управляемого n -фазного формирователя импульсных последовательностей $ФФ$; преобразователя уровня $ПУ$; синхронизатора $С$; блока формирования

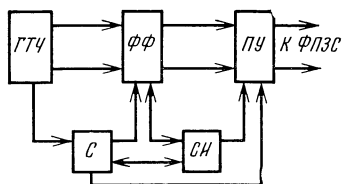


Рис. 5.1. Структурная схема устройства управления ФПЗС

ями, из секций в регистры и т. д. Количество импульсов в пачках задается выходными сигналами блока синхронизации. Блок синхронизации формирует также распределение уровней на фазовых электродах в промежутках времени между переносами зарядовых пакетов. Формирование пачек может осуществляться двояко: с помощью внутреннего независимого таймерного устройства либо путем подсчета заданного числа импульсов из блоков ГТЧ или ФФ. Пачки фазовых импульсов иногда вырабатываются непосредственно в блоке ГТЧ. По сигналам блока синхронизации изменяют при необходимости уровни или форму сигналов, формируемых блоком ПУ. Рассмотрим подробнее функционирование и способы реализации блоков, входящих в устройство управления ФПЗС.

Генератор тактовой частоты. В качестве надежного, защищенного от изменений температуры ($-40 \dots +60^\circ\text{C}$) при эксплуатации источника опорных тактовых импульсов частотой f рекомендуется [85] применять синхронный генератор, стабилизированный кварцевым резонатором, работающим на первой гармонике механических колебаний. Частота f равна частоте тактирования выходного регистра и определяется выражением

$$f = N(H - a), \quad (5.1)$$

где N — число элементов выходного регистра, участвующих в формировании изображения; H — длительность строки; a — длительность интервала обратного хода строчной развертки. Обычно выходной регистр содержит дополнительные элементы после входного и перед выходным устройствами. Эти элементы не участвуют в формировании изображения на экране ВКУ, и во избежание искажений заряды с них должны выводиться во время обратного хода строчной развертки. Величина H равна поэтому разности между полным числом элементов регистра и числом дополнительных элементов. В выходном регистре матрицы типа ФПЗС 1М содержится всего 532 элемента, из них по 10 дополнительных элементов расположены у входа и выхода регистров, т. е. $N=512$. Частоты первой гармоники механических колебаний кварцевого резонатора $f_{\text{рез}}$ и выходного регистра f должны быть кратны частоте строк [85]

$$f/f_{\text{стр}} = n; f_{\text{рез}}/f_{\text{стр}} = m, \quad (5.2)$$

где $f_{\text{стр}}$ — частота строчной развертки; m, n — целые числа, ко-

эффиценты кратности частот. Если отношение частоты $f_{\text{рез}}$, вычисленной по (5.1), к $f_{\text{стр}}$ не является целым числом, это отношение округляют до ближайшего целого числа и по (5.2) находят ближайшее кратное значение частоты работы выходного регистра f' . Затем определяют число переносов M во время прямого хода строчной развертки при работе регистра на частоте f'

$$M = f' (N - a). \quad (5.3)$$

Полученное из (5.3) число переносов отличается от числа элементов регистра N , и это приведет к искажениям информации. Расчет, приведенный в [85] для ФПЗС-1М, дает следующие значения: $f = 9846,1538$ кГц, $f' = 9843,75$ кГц, $M = 511,875$. Видно, что разность $(N - M)$ мала, и искажением ТВ-изображения можно пренебречь. Однако имеются исторически сложившиеся частоты кварцевых резонаторов, равно как и стандартные частоты синхроимпульсов. Широко используемый сигнал ССЦ-2 имеет частоту 1 МГц; ее подставляют в (5.3) вместо частоты f' и находят новое значение $M = 520$. Выходной регистр во время прямого хода строчной развертки будет работать на восемь тактов больше, чем следует для вывода информационных зарядов. В результате размеры изображения по горизонтали уменьшаются, возникает некоторое искажение. По краю раstra появится темная вертикальная полоса, которую можно убрать, увеличив длительность строчного гасящего импульса примерно на 0,8 мкс. При разработке матричных ФПЗС для работы в вещательном ТВ-стандарте следует учитывать приведенные соображения для выбора такого числа элементов по горизонтали, которое обеспечило бы минимум искажений информации. Использование LC-генератора, работающего в старт-стопном режиме, приводит к значительным искажениям (по [85] до $\pm 10\%$ в рабочем диапазоне температур) изображения и появлению по краю раstra темной вертикальной полосы. Несинхронный генератор, стабилизированный кварцевым резонатором, также мало приемлем в качестве ГТЧ, поскольку границы тактовых импульсов не строго фиксированы во времени, и это может приводить к снижению четкости изображения.

Формирователь фазовых импульсных последовательностей. Блоком ФФ выполняются следующие функции [84]: установка статических (начальных) состояний на выходах по заданным состояниям на входах; формирование последовательностей фазовых импульсов под действием входных импульсов от ГТЧ или вырабатываемых самостоятельно при работе в автогенераторном режиме; изменение режима работы под действием внешнего сигнала: разрешение или запрет формирования импульсных последовательностей, т. е. перевод ФФ в динамическое или статическое состояние (эта операция может выполняться в другом блоке).

Работа формирователя описывается динамической передаточной характеристикой, т. е. диаграммой, устанавливающей соответствие между входными и выходными сигналами. К основным параметрам ФФ относятся:

максимальная частота входного тактового сигнала, при которой еще не наступают сбои в формируемой временной диаграмме; минимальная длительность входного импульса, определяемая погрешностью формирования выходных импульсов;

время перекрытия выходных импульсов, т. е. интервалы времени, в течение которого одновременно на двух выходах устанавливаются одинаковые логические сигналы по уровню 0,5 от уровня лог. 1;

время задержки от тактового входа к соответствующему выходу при выключении (включении);

время перехода при включении (выключении), определяемое как интервал времени между подачей сигнала на вход разрешения и переходом формирователя из статического состояния в динамическое и наоборот.

Значения перечисленных параметров для формирователей в интегральном исполнении типов К1119АП2 и К1124АП2 приведены в гл. 4.

Формирователи фазовых импульсов могут строиться по двум схемам: *многофазные автогенераторы* и *распределители импульсов*, поступающих от ГТЧ. Автогенераторы являются асинхронными устройствами и не нуждаются в ГТЧ. В типичной кольцевой автоколебательной схеме используют нечетное число логических элементов (инверторов), последовательности фазовых импульсов формируются с помощью задержки управляющего сигнала при распространении его по цепочке инверторов. Пример простейшего трехфазного кольцевого ФФ приведен в [86]; схема собрана на микросхеме серии К155 или К531 и работает на частотах до 25 ... 30 МГц. К недостаткам асинхронных кольцевых ФФ относятся трудность перестройки частоты и невысокая стабильность частоты, вызываемая зависимостью процесса переключения логических элементов от напряжения питания и температуры.

Формирователи-распределители тактовых импульсов наиболее распространены, поскольку стабильность их работы определяется стабильностью частоты и фазы ГТЧ и может быть очень высокой; кроме того, в них легче осуществить регулировку параметров выходных импульсов.

Время перекрытия выходных импульсов регулируют, изменяя период или длительность входных тактовых импульсов, причем второй способ предпочтителен, поскольку позволяет осуществить независимо от изменения времени перекрытия перестройку частоты выходных импульсов.

Для построения формирователей-распределителей широко используют микросхемы триггеров; описаны также ФФ на микросхемах ЗУ и логических элементах [84]. Формирователи на микросхемах триггеров выполняются на основе кольцевых счетчиков либо сдвиговых регистров. Формирователи на основе кольцевого счетчика с регулировкой времени перекрытия состоят из двух триггерных структур. Первая из них — собственно кольцевой счетчик, осуществляющий формирование последовательности фазовых вы-

ходных импульсов при подаче на вход тактовых импульсов от ГТЧ. Вторая обеспечивает требуемое время перекрытия выходных импульсов и управляется выходными импульсами кольцевого счетчика и входными тактовыми импульсами. Кольцевые счетчики реализуют на триггерах типов D или $J-K$, формирователь времени перекрытия на RS -триггерах. На рис. 5.2 приведена структурная схема трехфазного ФФ.

Установка статического распределения потенциалов на выходах ФФ осуществляется посредством подачи управляющих сигналов на установочные входы триггеров кольцевого счетчика. При этом установочные входы могут блокироваться общим для всех триггеров входом разрешения. Низкий потенциал на входе разрешения запрещает установку, при приходе на него разрешающего импульса осуществляется установка в соответствии с комбинацией сигналов на установочных входах. Изменение уровней логических сигналов, задающих статическое состояние, выполняется в интервалы времени между разрешающими импульсами.

Формирователи фазовых сигналов на основе сдвигового регистра мало чем отличаются от рассмотренных. Охваченные цепью обратной связи, они выполняют функции кольцевого счетчика. Использование сдвиговых регистров облегчает управление: например, при применении К155ИР1 сдвиг фазовых импульсов влево или вправо достигается подачей лог. 0 или 1 соответственно на вход выборки режима работы [85].

В формирователь на основе микросхем ЗУ, помимо собственно ЗУ, входят адресный счетчик, блок формирования перекрытия импульсов и логический элемент для организации управления оставшимся формированием.

На основе ЗУ ФФ помехоустойчив, так как сбой вызывается только неправильной адресацией, и может работать на достаточно высоких частотах. Характеристики разных типов ФФ сравниваются в табл. 5.1, взятой из [84]. Из таблицы можно сделать следующие выводы: наибольшую компактность при хороших частот-

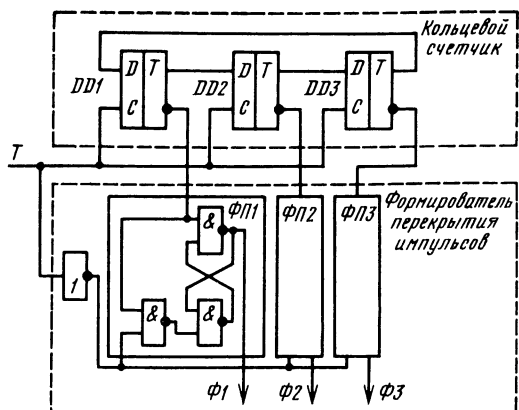


Рис. 5.2. Структурная схема блока формирователя фазовых импульсов

Параметры формирователей фазовых сигналов на основе микросхем

Параметры	Формирователь фазовых сигналов на основе				
	кольцевого счетчика				
	К1138АП	155	531	555	564
Время задержки, нс	15...	80	20	80	45
Максимальная частота входного тактового сигнала, МГц	40	10	35	10	5
Потребляемая мощность, Вт	0,3	0,6	0,6	0,15	0,03
Число корпусов микросхем, шт	1	10	10	10	15

	сдвигового регистра			постоянного ЗУ		
	155	531	555	155	531	564
Время задержки, нс	120	80	120	150	110	1300
Максимальная частота входного тактового сигнала, МГц	8	15	8	7	8	6
Потребляемая мощность, Вт	0,6	0,6	0,25	1,5	1,9	0,1
Число корпусов микросхем, шт	4	5	5	4	4	4

ных свойствах обеспечивает микросхема К1138АП; максимальное быстродействие достигается в ФФ на основе кольцевого счетчика при использовании микросхемы типа 531; сверхнизким потреблением, но малым быстродействием характеризуются ФФ на основе микросхемы КМОП серии 564; ФФ на основе ПЗУ этой серии требуют минимальное количество корпусов.

Преобразователь уровня под действием цифровых входных сигналов формирует выходные импульсы, непосредственно подающиеся на ФПЗС. К выходным импульсам с блока ПУ предъявляются достаточно серьезные требования по форме и длительности (от этих параметров зависит эффективность переноса), амплитуда выходных импульсов может превышать 25 В. ФПЗС представляет для ПУ большую емкостную нагрузку: емкости фазы регистра в крупноформатной матрице или в линейке достигают 500...1000 пФ. При работе такого регистра на частоте около 10 МГц длительность тактового импульса составляет примерно 50 нс, т. е. время нарастания фронта импульса, формируемого на выходе ПУ, можно оценить в 10...20 нс. Ток, необходимый для перезарядки емкости фазы, равен

$$I = (U_s C_n) / t_{\phi}, \quad (5.4)$$

где U_s — максимальная амплитуда импульса; C_n — эквивалентная емкость нагрузки; t_{ϕ} — время нарастания фронта. Подставив в (5.4) приведенные для оценки значения, получим, что ток в импульсе может превышать 1 А.

Блок ПУ в простейшем случае формирует двухуровневые импульсы — этого достаточно для того, чтобы организовать перенос зарядовых пакетов. Более сложные многоуровневые ПУ помимо формирования импульсов управления переносом вырабатывают импульсы с несколькими постоянными уровнями или импульсы с плавноизменяющимся уровнем. Такие импульсы нужны для выполнения функций: организации накопления; изменения апертурной характеристики и частичного подавления блуминга из-за перевода не участвующих в накоплении фазовых электродов в состояние обогащения; повышения эффективности переноса (трехуровневые импульсы, например, обеспечивают меньшие потери при переносе, нежели двухуровневые); снижения расхода энергии от источников питания в многофазных регистрах [84].

Преобразователи уровня любого типа описываются *статическими и динамическими характеристиками и параметрами*. К статическим относятся: переключательная характеристика, устанавливающая соответствие входных сигналов (лог. 0 или 1) и выходных уровней; допустимые напряжения источников питания уровней, определяющие диапазон регулировки амплитуды выходных импульсов; входные токи, потребляемые ПУ от источника входного сигнала при лог. 0 или 1; помехозащищенность, т. е. допускаемые отклонения уровней логических сигналов на входе, не вызывающие сбой работы ПУ (ложное переключение).

Динамические свойства ПУ характеризуются временами задержки включения и выключения, нарастания и спада выходного импульса; максимальной частотой следования выходных импульсов, обратно пропорциональной сумме времен задержки; нагрузочной способностью (максимальная емкость нагрузки на данной частоте); максимальной допустимой рассеиваемой мощностью, которая соответствует нагреву ПУ до максимального допустимого уровня.

На рис. 5.3 приведены схемы двухуровневых ПУ [86]. Когда не требуется работа на высокой частоте и допустим однополярный выход, может быть использована схема рис. 5.3,а. Каскад предварительного усиления цифровых входных сигналов выполнен на биполярном транзисторе VT2, в коллекторную цепь которого включен форсирующий транзистор VT1, позволяющий форми-

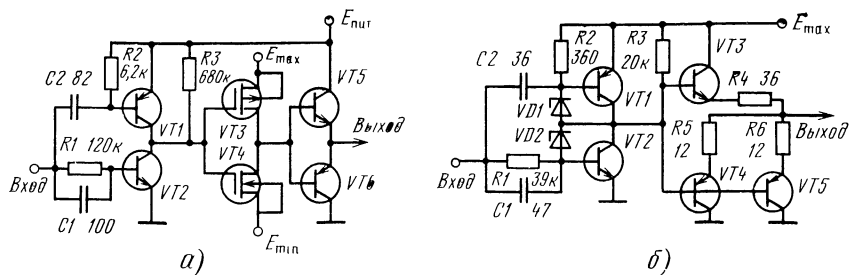


Рис. 5.3. Схемы преобразователей уровня для низкой (а) и высокой (б) частоты

ровать крутой фронт импульсов на выходе каскада. С помощью собранного на паре дополняющих МОП-транзисторов $VT3$ и $VT4$ инвертора задаются уровни выходных импульсов путем изменения напряжений E_{\max} и E_{\min} .

Выходной эмиттерный повторитель на дополняющих биполярных транзисторах $VT5$ и $VT6$ позволяет формировать импульсы с фронтом 50..100 нс на емкости до 2000 пФ. Максимальная частота ПУ составляет сотни кГц и может быть повышена включением параллельно коллекторному переходу транзистора $VT2$ диода Шотки типа КД514А — это не позволяет перейти $VT2$ в насыщение и одновременно снижает сквозной ток через $VT1$ и $VT2$ в момент переключения. Как и любая двухтактная система, данная схема ПУ требует тщательного подбора пар транзисторов. При идентичных характеристиках ключей сквозной ток ПУ и соответственно потребляемая мощность весьма малы. К достоинствам схемы следует отнести помимо простоты возможность независимой регулировки уровней выходных импульсов. Недостатком является необходимость соблюдения условия $E_{\max} \geq E_{\min} \geq 0$. Чтобы избежать этого, рекомендуется включить между входом (после $R1$) и базой транзистора $VT2$ дополнительный транзистор с общей базой. Эмиттер $VT2$ в этом случае не заземляется и на него подают отрицательное смещение (между эмиттером и базой $VT2$ включают резистор 68 кОм). Уровни выходных импульсов при такой схеме ПУ не связаны с уровнем входного сигнала и реализуется условие $E_{\min} \leq E_{\max} \leq 0$.

Степень перекрытия выходных импульсов может быть увеличена затяжкой отрицательного (для ПЗС с каналом p -типа) или положительного (для ПЗС с каналом n -типа) фронта посредством включения сопротивления в эмиттер транзисторов $VT6$ или $VT5$.

На частотах до 10...15 МГц работает ПУ, собранный по схеме рис. 5.3,б. В каскаде предварительного усиления коллекторные переходы дополняющей пары транзистора $VT1$ (КТ363) и $VT2$ (КТ399) шунтированы диодами Шотки $VD1$, $VD2$ (типа КД514А). Резисторы $R5$ и $R6$ выравнивают токи выходных транзисторов $VT4$ и $VT5$ (оба КТ363). В эмиттер выходного транзистора $VT3$ (КТ325) включен резистор, затягивающий положительный фронт выходного импульса. Номинал резистора подбирают экспериментально. Схема позволяет получать импульсы с фронтами менее 10 нс на емкости до 120 пФ при максимальной частоте. К недостатку схемы можно отнести фиксированный нижний уровень выходных импульсов, который составляет примерно 0,5 В.

Конструируя ПУ, следует помнить, что времена нарастания и спада выходных импульсов должны сохраняться неизменными при изменении их амплитуды [84]. Для выполнения этого условия выходной каскад выполняют по схеме двухтактного ключа на биполярных транзисторах и используют два источника входного базового тока: одним регулируют время нарастания, другим — спа-

да. Регулировка входных токов, компенсирующая изменение амплитуды выходного сигнала, должна производиться в схеме автоматически.

В гл. 4 приведены параметры двухуровневого ПУ в интегральном исполнении — микросхемы типа К1119ПУ1. В качестве ПУ для ФПЗС может быть использована микросхема К170АПЗ, предназначенная для управления ЗУ. Интегральная микросхема К170АПЗ обеспечивает на частоте до 10 МГц амплитуду импульсов до 20 В при емкости нагрузки до 200 пФ. На рис. 5.4 показана схема включения К170АПЗ. Согласующий преобразователь на входе выполнен на основе ключевого элемента $VT1$ и отражателя тока $VT2$ и $VT3$. При уровне входного сигнала, соответствующем лог. 1, ключ $VT1$ открыт и насыщен, через транзисторы $VT1$ и $VT2$ протекает ток, определяемый напряжением источника питания E_3 и резисторами $R1$, $R2$. Такой же ток, повторяющийся через отражатель тока, будет протекать в коллекторной цепи $VT3$ и, следовательно во входной цепи К170АПЗ. Значение тока должно быть не менее 8 мА, тогда выходной уровень определится напряжением источника питания $E2$. Отрицательный перепад на входе приведет к запиранию транзистора $VT1$, входной ток К170АПЗ уменьшится практически до нуля, а выходной сигнал изменится до уровня, соответствующего напряжению источника питания $E1 > E2$ (напряжения $E1$ и $E2$ могут быть положительными или отрицательными). Конденсаторы $C1$ и $C2$ включены для ускорения переходных процессов в микросхеме и транзисторе $VT1$.

Многоуровневые преобразователи уровня обеспечивают, как правило, четыре уровня выходных импульсов и выдерживают заданные соотношения времен нарастания и спада при переходе от уровня к уровню. На рис. 5.5 показан вид выходного сигнала, используемого для управления типовой матрицей ФПЗС с переносом

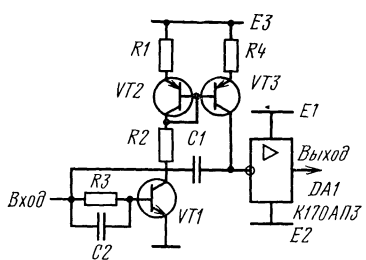


Рис. 5.4. Двухуровневый преобразователь уровня на микросхеме К170АПЗ

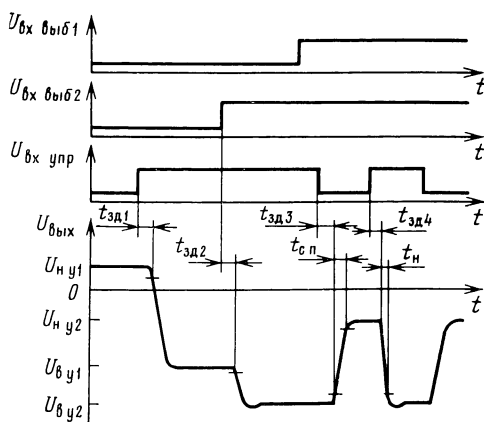


Рис. 5.5. Сигналы на входах и выходе преобразователя уровня, используемого для управления матрицей с переносом кадра

кадра и поверхностным каналом p -типа; приведены также входные сигналы, необходимые для его формирования. Уровень $U_{н.у1} < 0$ и используется для создания условий обогащения под выбранной фазой (фазами) секции накопления, а уровень $U_{в.у1}$ задает режим накопления. Два других уровня используются для формирования потенциальных ям при переносе: $U_{н.у2}$ соответствует выталкиванию; $U_{в.у2}$ — приему зарядового пакета. Для управления формированием четырех уровней достаточно двух цифровых входов (входы выборки), однако для упрощения взаимодействия с блоком ФФ обычно добавляют третий управляющий вход. Если на управляющий вход подан лог. 0 (см. рис. 5.5), то на выходе ПУ задается один из пары нижних уровней изменением сигнала первой выборки. При логической единице на управляющем входе, изменяя сигнал второй выборки, задают на выходе один из пары верхних уровней. Если на оба входа выборки подана лог. 1, изменение сигнала на управляющем входе вызовет периодическое переключение с $U_{н.у2}$ на $U_{в.у2}$ и обратно, необходимое для организации переноса зарядов. Для управления m -фазным ФПЗС требуется m многоуровневых преобразователей с передаточной характеристикой, подобной описанной. Иногда возникает необходимость в более сложных ПУ. Например, для обеспечения накопления с минимальной темновой составляющей один из уровней следует плавно изменять. Этого можно добиться, осуществив в ПУ формирование большого числа дискретных уровней выходного сигнала или используя в качестве источника питания одного из уровней генератор линейно изменяющегося напряжения.

В гл. 4 приведены параметры многоуровневых ПУ в интегральном исполнении: К1119ПУ2 на основе биполярных параллельно соединенных ключей и К1124ПУ1 на основе каскадно соединенных КМОП-транзисторов. К достоинствам ПУ с параллельным соединением ключей относятся высокая точность поддержания уровней выходных импульсов (поскольку погрешность задания определяется падением напряжения на одном замкнутом ключе) и малое число выходных мощных ключей, к недостаткам — сложное управление ключами, исключающее возможность замыкания более одного ключа в статике и динамике. Преобразователями уровня с каскадным включением транзисторов, напротив, управлять намного проще, но погрешность задания уровней при последовательном соединении ключей больше, чем в первом варианте.

Блок синхронизации. В функции этого блока входят, как отмечалось выше, установка начальных состояний и задание интервалов времени. Последовательность управления, например, матричным ФПЗС с переносом кадра следующая:

устанавливается смещение на фазовых электродах секции накопления и выдержка времени накопления;

то же самое выполняется для секции памяти — в течение почти всего времени накопления на фазовые электроды секции памя-

ти задается нулевое смещение (чтобы не накапливались темновые носители), а перед началом переноса устанавливается необходимое начальное смещение;

задаются интервалы времени переноса из секции накопления в секцию памяти и последовательности интервалов времени выноса из секции памяти в выходной регистр и из регистра в выходное устройство.

Упрощенная функциональная схема базового элемента синхронизации (рис. 5.6), включает двухвходовой логический элемент 1, триггерный элемент 2 и счетчик 3. Если на входе V логического элемента установлен сигнал разрешения, то приход импульса на вход S вызовет появление на выходе логического элемента импульса, который перебросит триггер и установит на выходе сигнал $Q=1$. Этот сигнал разблокирует счетчик, на вход C которого постоянно подаются тактовые импульсы с периодом T . В счетчик предварительно записано по входу данных число N , соответствующее выдержке, которую должен сформировать элемент синхронизации $t_{\text{выд}} = NT$. Когда интервал выдержки закончится, на выходе dS счетчика появится импульс, перебрасывающий триггер в исходное состояние, подсчет тактовых импульсов счетчиком закончится и на выходе Q элемента синхронизации будет выработан импульс длительностью NT . В качестве элемента синхронизации можно использовать К589ХЛ4 [84], которая формирует импульс заданной длительности и пачку заполняющих его импульсов. На рис. 5.7, *a* показано условное обозначение микросхемы (входы: $C1$ — синхронизации (тактовый), $C2$ и $C3$ — синхронизации переноса, $V1$ — формирования длительности импульса (вход разрешения), $C1$ — переноса, EW — разрешения записи, $D1$ — $D4$ — предустановки пересчета; выходы: CO — переноса, F — делителя (счетчика), A — формирования пачки импульсов, B — формирования длительности). Коэффициент пересчета устанавливают, предварительно программируя входы $D1$ — $D4$. Импульсом начальной установки (вход EW) устанавливают микросхемы в предстартовое состояние. После этого первый тактовый импульс (вход $C1$) устанавливает четырех-

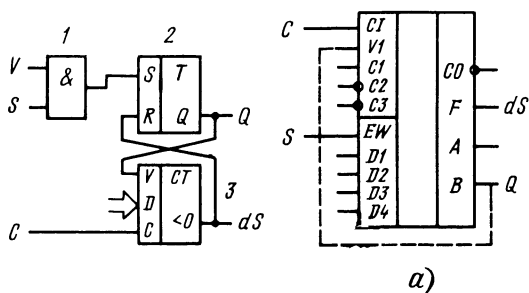


Рис. 5.6. Функциональная схема базового элемента синхронизации

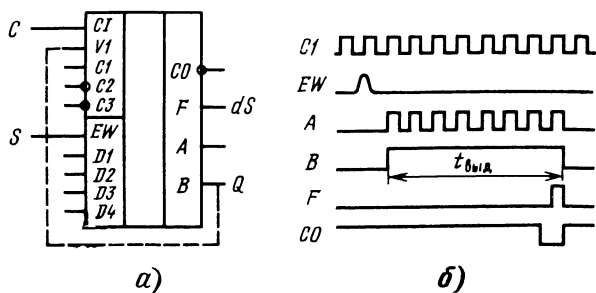


Рис. 5.7. Использование микросхемы типа К589ХЛ4 в качестве элемента синхронизации: *a* — условное обозначение; *б* — формируемые импульсные последовательности

разрядный счетчик в состояние, запрограммированное по входам $D1-D4$; последующие тактовые импульсы подсчитываются и пропускаются на выход (рис. 5.7,б). Последний по счету импульс вызывает появление импульса на выходе счетчика и соответственно на выходе F микросхемы. Одновременно появляется отрицательный импульс на выходе переноса CO . Этот импульс используется для объединения микросхем с целью увеличения разрядности. Для того чтобы сформировать на выходе B импульс заданной счетчиком длительности, надо соединить выход B со входом $V1$.

Из нескольких элементов синхронизации, таких, как $K589ХЛ4$, составляют блок синхронизации. Например, для синхронизации работы матрицы с переносом кадра в счетчики предварительно записывают характеристики формата — число строк и элементов в строке и регистре, а также длительность накопления. Элементы синхронизации, соединенные последовательно, подсчитывают тактовые импульсы и выдают синхросигналы на входы разрешений формирователей фазовых сигналов; окончание счета в предыдущем элементе вызывает включение последующего. Тактовые импульсы с частотами, соответствующими работе выходного регистра и секций матрицы, вырабатывает ГТЧ. С него же поступают строчные и кадровые синхроимпульсы, которые используются затем в блоке синхронизации как опорные для формирования интервалов (например, формируемая блоком синхронизации длительность накопления обратно пропорциональна частоте строчных синхроимпульсов, для работы в автоматическом режиме используется кадровый синхроимпульс и т. д.).

Блоки генератора тактовых частот и синхронизации тесно связаны между собою, так что чаще используют термин «синхрогенератор». Примером синхрогенератора в интегральном исполнении служит микросхема типа $K1124AP2$ (см. гл. 4).

Схемы усиления и обработки видеосигнала. Снимаемый с выхода ФПЗС видеосигнал является дискретно-аналоговым и представляет аддитивную смесь информационного сигнала, тактовых помех и шумов. Задачи, решаемые устройствами усиления и обра-

ботки видеосигнала, сводятся к следующим: предварительное усиление и улучшение отношения сигнал-шум; подавление тактовых помех; специальная обработка (дифференцирование, сложение сигналов и др.).

Предварительный видеоусилитель регистрирует изменение тока выходного транзистора, находящегося на кристалле ФПЗС. Вариант схемы широкополосного видеоусилителя приведен на рис. 5.8 [86]. Входное сопротивление транзистора $VT2$ мало, и поэтому

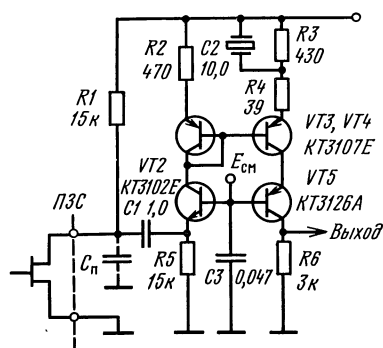


Рис. 5.8. Схема широкополосного предварительного усилителя для ФПЗС

паразитная емкость $C_{\text{п}}$ практически не влияет на полосу частот усилителя, достигающую 15 МГц. Коэффициент усиления по току равен примерно $R_2/(R_4+r_3)$, где r_3 — дифференциальное сопротивление эмиттера транзистора VT_4 . Если ФПЗС имеет два выхода, основной и компенсационный (например, К1200ЦМ1), становится возможным использование дифференциального предусилителя, эффективно подавляющего тактовые помехи [87]. Для фильтрации тактовой наводки от фаз выходного регистра (частота в 2...4 раза выше частоты видеосигнала) и других высокочастотных помех используются типовые схемы ФНЧ. Основную трудность представляет подавление низкочастотной когерентной помехи от транзистора сброса и некогерентных помех (шумов). Эффективным способом борьбы с этими помехами, по крайней мере в диапазоне рабочих частот до 5...10 МГц, оказывается двойная коррелированная выборка (ДКВ).

Принцип ДКВ заключается в выборке, запоминании и последующем вычитании видеосигнала в моменты отсутствия и наличия информации. Структурная схема, приведенная на рис. 5.9, поясняет сущность ДКВ. Ключ $K1$ представляет собой транзистор сброса, заряжающий узел считывания с эквивалентной емкостью $C1$ до опорного напряжения. В отсутствие ДКВ наводка от транзистора сброса передается на предусилитель $У1$, свободно проходит ФНЧ и появляется в узле A (показанный штриховой линией резистор обозначает внешнюю нагрузку). На диаграмме выходного сигнала отрезок (t_0-t_1) соответствует проводящему состоянию транзистора сброса. Затем следует отрезок (t_1-t_2) , соответствующий установлению плавающего потенциала на узле считывания. В момент t_2 в узел считывания поступает информационный заряд, вызывая уменьшение плавающего потенциала. Нас интересует рабочий отрезок (t_2-t_3) , в течение которого в узле A появляется сумма наводки и информационного сигнала. Чтобы исключить на-

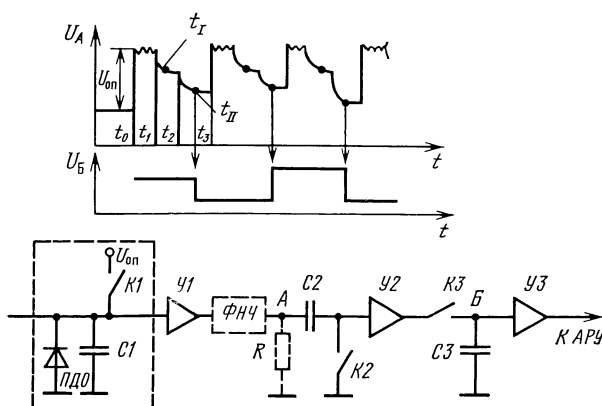


Рис. 5.9. Структурная схема ДКВ (а) и форма сигнала на входе и выходе ДКВ (б)

водку, в момент t_1 , т. е. до прихода информационного сигнала, замыкают ключ $K2$. На правой обкладке конденсатора $C2$ будет некоторый фиксированный потенциал (в схеме равный нулю), сам же конденсатор окажется заряженным до уровня, пропорционального величине наводки. Затем ключ $K2$ размыкают и в момент t_{11} замыкают ключ $K3$. В узле A в этот момент присутствуют наводка и полезный сигнал. Конденсаторы $C2$ и $C3$ соединены последовательно, в $C2$ хранится значение наводки, следовательно, с $C3$ считывается разность, представляющая собственно информационный сигнал. Если время между двумя выборками много меньше $0,5(R_{\text{вых}}C1)$, где $R_{\text{вых}}$ — сопротивление канала разомкнутого транзистора сброса, шум выборок окажется коррелированным. И, вычтя выборку I из выборки II, можно значительно снизить уровень шума ФПЗС. Типичные значения $R_{\text{вых}} = 10^{12}$ Ом, $C = 10^{-13}$ Ф, т. е. время между выборками должно быть много меньше секунды, что для большинства режимов работы ФПЗС легко выполнимо.

На диаграмме рис. 5.9 видно, что видеосигнал после ДКВ имеет специфическую форму: значение информационного сигнала запоминается на конденсаторе хранения $C3$ до момента прихода следующего импульса выборки II, сигнал «растягивается» на длительность тактового импульса выходного регистра ФПЗС. Двоичная коррелированная выборка подавляет не только шумы сброса, но и $1/f$ шум, низкочастотный шум источников питания, дрожание управляющих импульсов, шумы, связанные с работой ключей.

На рис. 5.10 в качестве примера показана принципиальная схема одного из возможных вариантов выполнения ДКВ [88]. Особенностью схемы является то, что импульс управления выборкой II поступает на парафазный каскад. Импульс положительной полярности с этого каскада через конденсатор $C3$ подается на затвор ключа $VT4$, подсоединяющего конденсатор хранения $C4$. Напряжение на $C4$ сохраняется до прихода следующего импульса

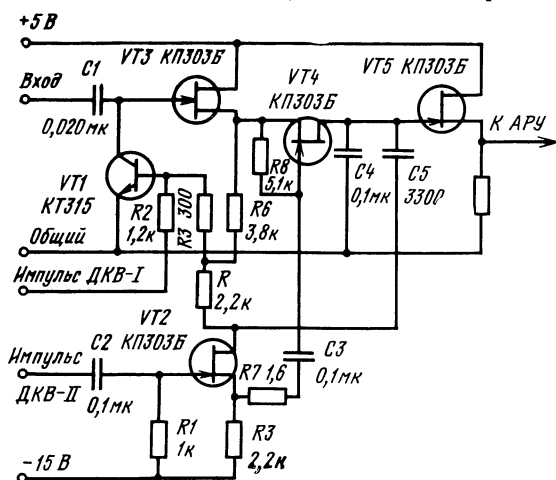


Рис. 5.10. Принципиальная схема ДКВ

выборки II. Длительность импульсов управления I и II мала (несколько десятков наносекунд), и чтобы конденсатор $C4$ успевал полностью зарядиться, его номинал следовало бы выбирать небольшой. Однако чем меньше $C4$, тем больше тактовая помеха, проходящая на выход ДКВ, поэтому величину $C4$ приходится выбирать компромиссно. Для подавления тактовой помехи подают через $C5$ с парафазного каскада импульс отрицательной полярности. При равенстве $C5$ и емкости затвор—сток транзистора $VT4$ компенсация помехи наиболее полная. Транзисторы $VT3$ и $VT5$ играют роль буферных усилителей.

Дальнейшим развитием идеи ДКВ явилась *счетверенная коррелированная выборка* [66], при которой выбираются два значения помехи U_1 и U_4 до и после информационного сигнала и два значения U_2 , U_3 в интервале времени, соответствующем приходу зарядового пакета в узел считывания. Выборки подают на фильтр, выполняющий операцию $U_{\text{вых}} = 0,5(U_2 + U_3 - U_1 - U_4)$. Более подробные сведения о характеристиках и методах расчета ДКВ можно найти в [84, 87].

Следует подчеркнуть, что качество видеосигнала в значительной степени определяется продуманностью конструкции и монтажа устройств управления и обработки. В [66] даются ценные практические советы:

- все заземляемые шины должны быть большого сечения и обязательно выходить из одной точки;

- проводники, ведущие к стокам и истокам транзисторов выходного устройства, входным и выходным затворам и диодам, следует экранировать так же, как и сам предусилитель;

- предусилитель и выходные каскады ПУ располагаются возможно ближе к ФПЗС;

- источник питания стока транзистора сброса должен быть прецизионным, а выходной каскад, с которого поступают импульсы на затвор транзистора сброса, следует питать от отдельного стабилизированного маломощного источника;

- стабилизаторы в цепях питания должны быть быстродействующими, так же как и развязывающие фильтры (постоянная времени фильтра не должна превышать длительности нескольких тактовых импульсов).

5.2. Телевизионные камеры на ФПЗС

Твердотельные ТВ-камеры являются основой видеоаппаратуры любого типа. Описано большое число схемотехнических решений ТВ-камер, исходя из степени сложности, их можно подразделить на следующие виды:

- камеры на линейных ФПЗС черно-белого изображения (реже — цветного, в телекиноаппаратуре), используемые в основном в измерительных системах;

- камеры на матричных ФПЗС черно-белого и цветного изображения для широкого спектра применений;

специализированные камеры (малокадровые, с межкадровым вычитанием).

Разработана и подготовлена к серийному выпуску серия унифицированных по конструкции и габаритным размерам ТВ-камер на линейных ФПЗС типов К1200ЦЛ1; К1200ЦЛ2 и К1200ЦЛ5; К1200ЦЛ6, предназначенных для использования в модульной системе контроля размеров и положения деталей [88]. Типовая структурная схема телекамеры модульной системы включает: оптико-механический блок; тактовый генератор; видеоусилитель, усиливающий и фильтрующий видеосигнал; блок автоматического регулирования чувствительности, который сравнивает амплитуду видеосигнала с заданной и регулирует, воздействуя на тактовый генератор, время накопления. Оптико-механический блок имеет модификации с одним и двумя объективами (обычным и микрообъективом, соединенными последовательно). Первая модификация используется при масштабе преобразования изображения меньше единицы, вторая — при масштабе больше единицы.

На рис. 5.11 приведена принципиальная схема синхрогенератора камеры на ФПЗС типа К1200ЦЛ5.

Одна из первых отечественных матричных ТВ-камер была выполнена на среднеформатном ФПЗС типа К1200ЦМ1. Чувствительность камеры не хуже 2 лк при полосе видеосигнала 2 МГц, потребляемая мощность около 0,5 Вт.

В ТВ-камере на среднеформатной матрице типа ФПЗС-2М применены специализированные микросборки, что позволило снизить габаритные размеры ($60 \times 60 \times 45$ мм) и массу камеры. Конструктивно эта ТВ-камера выполнена в виде двух блоков: собст-

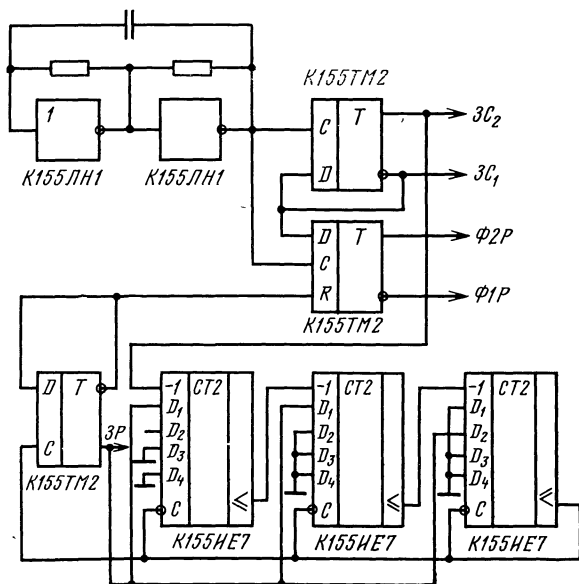


Рис. 5.11. Принципиальная схема синхрогенератора камеры на линейном ФПЗС типа К1200ЦЛ5

венно камерного блока и блока питания с формирова­телями уровней.

Матрица ФПЗС-2М использована также в телека­мере КТП-79, которая вместе с линейным блоком ЛБ-8, пуль­том управления ПУ-116 и телевизионным приемником «Шиялис 402Д» образует ПТУ «Матрица».

Дальнейшее снижение массогабаритных показате­лей в результате использования в камерах специализиро­ванных микросхем управления. Телевизионная камера на матрице К1200ЦМ1 и двух микросхем управления имеет габаритные раз­меры $45 \times 38 \times 15$ мм, массу 50 г и потребляет мощность 1 Вт от источника с напряжением 16 В [89]. Конструктивно камера со­стоит из двух плат: платы управления и платы усиления и обра­ботки видеосигнала. Принципиальная схема камеры приведена на рис. 5.12. На плате управления размещены две микросхемы: синх­рогенератор DA5 и преобразователь DA4, обе выполненные на основе КМОП-структур и представляющие ранний вариант микро­схем типа К1124АП1 и К1124ПУ1; схема формирования уровней потенциалов VD1—VD8 типа КД103Б со стабилизатором напряже­ния A6 на К142ЕН1Б; согласующие усилители сигналов гашения и синхронизации (микросхема К176 ЛЕ5). Интегральная микро­схема синхрогенератора содержит мультивибратор, частоту кото­рого изменяют, подключая конденсаторы C1 и C2. Возможен ре­жим работы от внешнего генератора. Интегральная микросхема вырабатывает две частоты управления выходным регистром: 4,5 МГц (период строчной развертки 64 мкс) и 2,25 МГц (период строчной развертки 128 мкс), в кадре содержится 313 строк. Обес­печивает накопление под первой фазой в нечетном поле и под второй в четном, остальные фазы находятся в режиме аккумуля­ции, создавая пространственную чересстрочную структуру. Синхро­генератор формирует также сигналы гашения и синхронизации. Интегральная микросхема ПУ состоит из одиннадцати КМОП-усилителей, девять из которых формируют двухуровневые им­пульсы для фаз регистра и секций матрицы, а два обеспечивают управление верхним и нижним уровнями фаз секции накопления. На второй плате расположены: ФПЗС (DA3); фильтр-пробка LC для предварительной фильтрации видеосигнала; схема обработки и усиления сигнала (DA1, DA2, VT1, VT2), включающая узел привязки к уровню черного; видеоусилитель и согласующие уси­лители, обеспечивающие низкоомный выход видеотракта.

В камере предусмотрена схема автоматического управления временем экспозиции, включающая преобразователь выходного на­пряжения пикового детектора (пропорционального уровню видео­сигнала) во временной интервал экспозиции и компаратор, кото­рый сравнивает уровень сигнала генератора пилообразного напря­жения частоты полей с уровнем выходного сигнала пикового де­тектора.

Камера обеспечивает четкость изображения около 150 ТВ-ли­ний по горизонтали и до 200 ТВ-линий по вертикали. Камера ос-

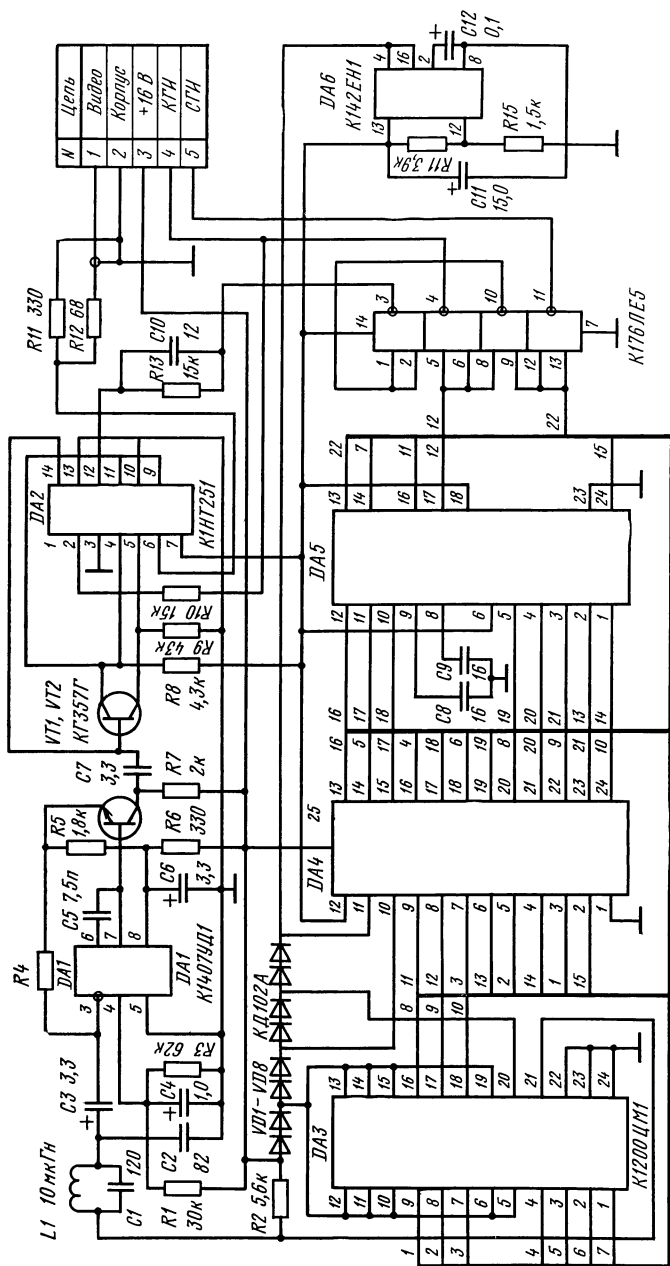


Рис. 5.12. Принципиальная схема ТВ-камеры на ФПЗС типа К1200 ЦМ1 и специализированных БИС управления

нащена объективом Т-40 с фокусным расстоянием 12,5 мм и светосилой 1/2,8, диапазон рабочих освещенностей 40 ... 1000 лк.

С 1984 г. начато серийное производство ТВ-камер типа КТ-2 на крупноформатной матрице К1200ЦМ7 [90, 91]. Камера КТ-2 собрана на микросхемах и дискретных элементах широкого применения по типовой схеме (синхрогенератор, преобразователи уровня, видеоусилитель), дополненной блоком формирования видеоимпульсов для цифроаналоговой обработки. Выходы камеры КТ-2 имеют следующее назначение:

с выхода 1 снимается полный ТВ-сигнал, который может быть подан на стандартные ВКУ или ТВ-приемник; размах сигнала 1 В на нагрузке 75 Ом;

с выхода 2 снимаются видеоимпульсы с частотой 7 МГц и амплитудой $(0,3 \pm 0,1)$ В на нагрузке 6,8 кОм, предназначенные для цифроаналоговой обработки. Они поступают на вход АЦП, который формирует цифровой код данного видеоимпульса;

ко входу выборки АЦП подводят с выхода 3 камеры импульсы горизонтального разложения с частотой 7 МГц и амплитудой $(15 \pm 1,5)$ В. Эти же импульсы поступают на счетный вход первого двоичного счетчика, обнуляющегося строчными синхроимпульсами (частота 15625 Гц, амплитуда $9 \pm 0,45$ В), которые с выхода камеры 4 поступают на вход установки первого счетчика;

с выхода 5 подаются на счетный вход второго двоичного счетчика импульсы вертикального разложения с частотой 15 625 Гц и амплитудой $(9 \pm 0,45)$ В. На вход установки в нуль этого счетчика поступают кадровые синхроимпульсы с выхода 6 камеры (частота 50 Гц, амплитуда $(9 \pm 0,45)$ В);

выход 7 предназначен для передачи на экран ВКУ служебной информации.

Камера КТ-2 позволяет, подключая несложные дополнительные устройства, получать информацию об амплитуде видеоимпульса и номере элемента в столбце и строке, которым сформирован видеоимпульс. Такое расширение функциональных возможностей камеры позволяет решить весьма насущную задачу точного определения координаты точки изображения с заданной яркостью.

Камера снабжена объективом «Вега» или оптическим блоком с изменяемым с помощью переходных колец увеличением. Ее основные параметры:

Диапазон изменения освещенности на объекте, лк	100 . 10 тыс.
Разрешающая способность по полю изображения	Не ниже 240 ТВ-линий
Число воспроизводимых градаций яркости	Не менее 6
Отношение сигнал-шум, дБ	Не менее 42
Сигнал синхронизации	по ГОСТ 7845—79
Размеры камеры с объективом «Вега», мм	234×122×60
Масса, кг	Не более 1,2
Рабочий диапазон температур, К	223 ... 313

На основе матрицы ФПЗС-1М (ФПЗС-4М) разработана ТВ-камера КТ-186 [92]. В камере КТ-186 широко использованы гибри-

но-пленочные микросборки, что позволило заметно улучшить массогабаритные показатели:

Размеры камеры без объектива, мм	89×59×55
Масса, г	360
Размеры выносного блока питания, мм	105×70×37

Прилагаемый блок питания обеспечивает 6,15 и 20 В. Блок преобразователей уровней состоит из трех микросборок в металло-стеклянных корпусах. Микросборки могут быть использованы для построения ТВ-камер на ФПЗС типов К1200ЦМ1, К1200ЦМ7, ФПЗС-2М. Также унифицированной является микросборка синхрогенератора, вырабатывающего все фазовые и служебные импульсы. Блок обработки видеосигнала включает предусилитель ФНЧ на основе LC-цепей, устройство АРУ, усилитель напряжения, схему привязки к уровню черного, усилитель мощности, схемы замешивания гасящих и синхрои́мпульсов. Применение схемы привязки и стробируемого АРУ обеспечивает сохранение постоянной контрастности выходного сигнала при 20-кратном изменении сигнала, поступающего на вход. Размах полного ТВ-сигнала ($1 \pm \pm 0,1$) В (это позволяет передавать его по коаксиальному кабелю на расстояние до 60 м). В камере предусмотрена автоматическая регулировка времени экспозиции (АРЭ). В схеме АРЭ, как и в АРУ, введено стробирование детектора видеосигнала с целью стабилизации работы. Параметры камеры КТ-186:

Диапазон освещенностей на объекте, лк	20 ... 100 тыс.
Разрешающая способность, ТВ-линии	Не менее 380
Число воспроизводимых градаций по яркости	Не менее 8
Потребляемая мощность, Вт	2,5
Диапазон рабочих температур, К	218 ... 313

Максимальной компактности в сочетании с хорошими характеристиками удастся достичь при использовании в камерах БИС управления. Примером может служить малогабаритная ТВ-камера, состоящая, по сути, из трех БИС: ФПЗС типа К1200ЦМ7, синхрогенератора К1124АП1 и преобразователя уровня К112ПУ1 [93]. Принципиальная электрическая схема камеры приведена на рис. 5.13. Парафазным генератором на транзисторе VT1 типа КП313А запускается БИС К1124АП1 (DD1). Частота генератора равна 21 МГц, она стабилизирована кварцевым резонатором KB1 типа РГ-05. Для управления секциями памяти и накопления ФПЗС сигналы с К1124АП1 подаются на токовые ключи, входящие в БИС К1124ПУ1 (DD2). Импульсы управления выходным регистром и транзистором сброса формируются К1124АП1 и токовыми ключами на дополняющих транзисторах типа КТ3157 и КТ361Г (VT5—VT12). Все блоки управления собраны на одной плате. Вторая плата камеры содержит схемы обработки видеосигнала. Видеоусилитель выполнен на К154УД3 (DA2), его усиление регулируется резистором обратной связи R7, верхняя граничная частота — конденсатором коррекции C13. Интегральная микросхема типа 564КТЗ (DA3), представляющая

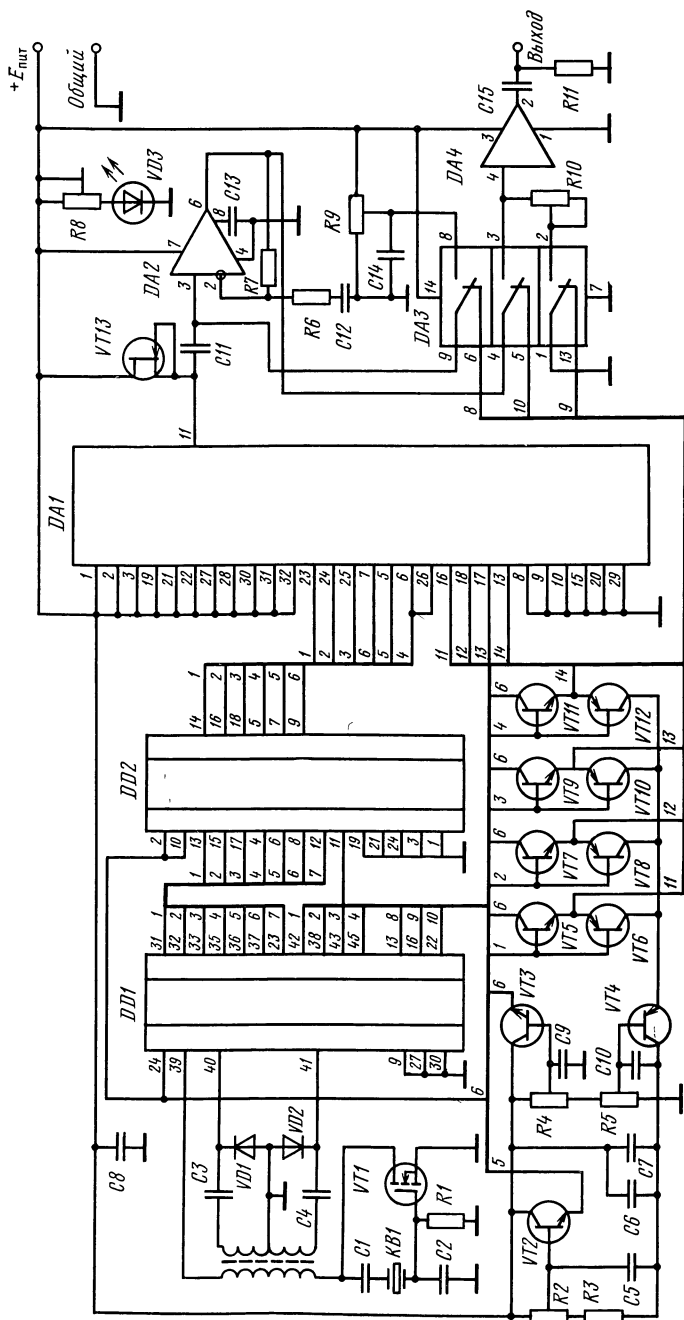


Рис. 5.13. Принципиальная схема ТВ-камеры на крупноформатной ФПЗС типа К1200 ЦМ7 и БИС управления

набор токовых ключей, формирует видеосигнал в соответствии с ГОСТ 7845—79 и управляется импульсами, поступающими с выходов К1124АП1—СГ (смесь гасящих), СС (синхросмесь), ФЧ (фиксация черного). Выходной усилитель DA4 согласует выход камеры (коаксиальный соединитель «видео» на задней крышке камеры) с емкостью кабеля. Обе платы расположены вдоль корпуса вертикально и разделены экранирующей перегородкой. Съемные боковые крышки корпуса обеспечивают доступ к платам для настройки и ремонта. Третья плата с ФПЗС (DA1) расположена перпендикулярно первым двум у торцевой стороны корпуса, в непосредственной близости к объективу. Технические характеристики камеры:

Разрешающая способность по горизонтали при освещенности 50 лк, ТВ-линии	Не менее 300
Число воспроизводимых градаций яркости	Не менее 8
Пороговая чувствительность с объективом «Вега», лк	Не хуже 0,5
Размах полного ТВ-сигнала на нагрузке 75 Ом, В	1
Размеры камеры (для отдельного источника питания), мм	60×43×37
Напряжение	12 ... 18 В
Потребляемая камерой мощность, Вт	1,1

В [93] приведены результаты натурных испытаний камеры. При съемке ночью объективом «Вега» (освещенность сцены 2 лк) на экране ВКУ четко видна фигура человека, находящегося на расстоянии 150 м от камеры. Применение длиннофокусного объектива «Карат» увеличивает дальность наблюдения до 300 м. Там же указано, что стоимость комплектующих изделий (кроме ФПЗС), использованных в камере, не превышает 70 руб.

В одном из последующих вариантов ТВ-камеры на ФПЗС типа К1200ЦМ7 управление также осуществляется БИС, но использованы КМОП БИС типа К1124 и биполярные типа К1119 (см. гл. 4), кроме того, в самой камере формируется цифровой сигнал для ввода в ЭВМ [94]. Встроенный аналогово-цифровой блок формирует выходной сигнал, пропорциональный амплитуде аналогового видеосигнала, и код координаты соответствующего элемента ФПЗС, определяемый по строчному и кадровому гасящим импульсам и импульсу сопровождающего элемента в выходном регистре (снимается с БИС синхрогенератора).

Принципиальные электрические схемы блоков камеры приведены в [94].

Преимущества использования для создания ТВ-камер «конструктора» из трех БИС — КТ200ЦМ7, К1124АП1 (или АП2) и К1124ПУ1 (или К1119ПУ) — настолько очевидны, что можно ожидать модификации серийной камеры КТ-2 на основе этих БИС. Наиболее отработанным вариантом для такой модификации представляется описанная в [95] ТВ-камера. На рис. 5.14 показана принципиальная электрическая схема платы управления ФПЗС. Микросхема управления К1124АП2 запускается парафазными импульсами с частотой 21 МГц, формируемыми квар-

цевым генератором. Трехфазные последовательности двухуровневых управляющих импульсов секций накопления и памяти формируются К1124ПУ1, регулировка амплитуды импульсов осуществляется потенциометром *R3*. Импульсы управления выходным регистром и транзистором сброса формируются инверторами К555ЛН1, преобразователями уровня К170АП3 и усилителями тока на комплементарных транзисторах КТ315А и КТ361А; амплитуда импульсов регулируется потенциометрами *R6*, *R7*. Для питания камеры используется источник с напряжением 12 В, дополнительный стабилизатор позволяет перейти на питание от бортовой сети 24 В. На подложку ФПЗС подается напряжение, несколько превышающее 12 В, из-за «вольтодобавки», организованной с помощью импульсов половинной строчной частоты (вывод 25, К1124АП2), пропущенных через цепь восстановления постоянной составляющей *VD2*, *C16* и фильтр *R9*, *C26*. Подобная мера позволит оптимизировать режим работы ФПЗС для любых образцов с разбросом по уровню управляющих импульсов.

Видеосигнал с ФПЗС подается на видеоусилитель, который состоит из блоков:

- широкополосного предусилителя с коэффициентом усиления около трех;

- схемы выборки-хранения на микросхеме К590КН8 и транзисторе КПП313. Импульсы выборки формируются микросхемой К590ЛА5 из импульсов управления первой и третьей фаз регистра и через схему восстановления постоянной составляющей поступают на затвор аналоговых ключей транзисторной сборки К590КН8А (рис. 5.15);

- дифференциального усилителя первого каскада, в котором осуществляется подавление коммутационной помехи, для чего на инверторный вход подают сигнал помехи с компенсационного канала;

- дифференциального усилителя второго каскада, являющегося аналоговым умножителем, в котором осуществляют АРУ с динамическим диапазоном 36 дБ;

- схемы фиксации уровня черного;

- корректора с коэффициентом усиления 4,1 и 0,44, в зависимости от значения входного напряжения;

- схемы замешивания в видеосигнал смеси гасящих импульсов (СМГ) и смеси синхроимпульсов (СМС).

На выходе видеоусилителя использована комплементарная пара транзисторов КТ315А и КТ361А, обеспечивающая работу телекамеры на нагрузку 75 Ом.

Телекамера выполнена в двух конструктивных вариантах: в пылевлагозащитном цилиндрическом корпусе диаметром 48 мм, длиной 165 мм и в миниатюрном корпусе размером 70×42×25 мм (включая объектив «Вега»). Масса камеры около 150 г. Во втором варианте использованы микрокорпусные диоды, транзисторы и радиокомпоненты, а также применена «книжная» упаковка

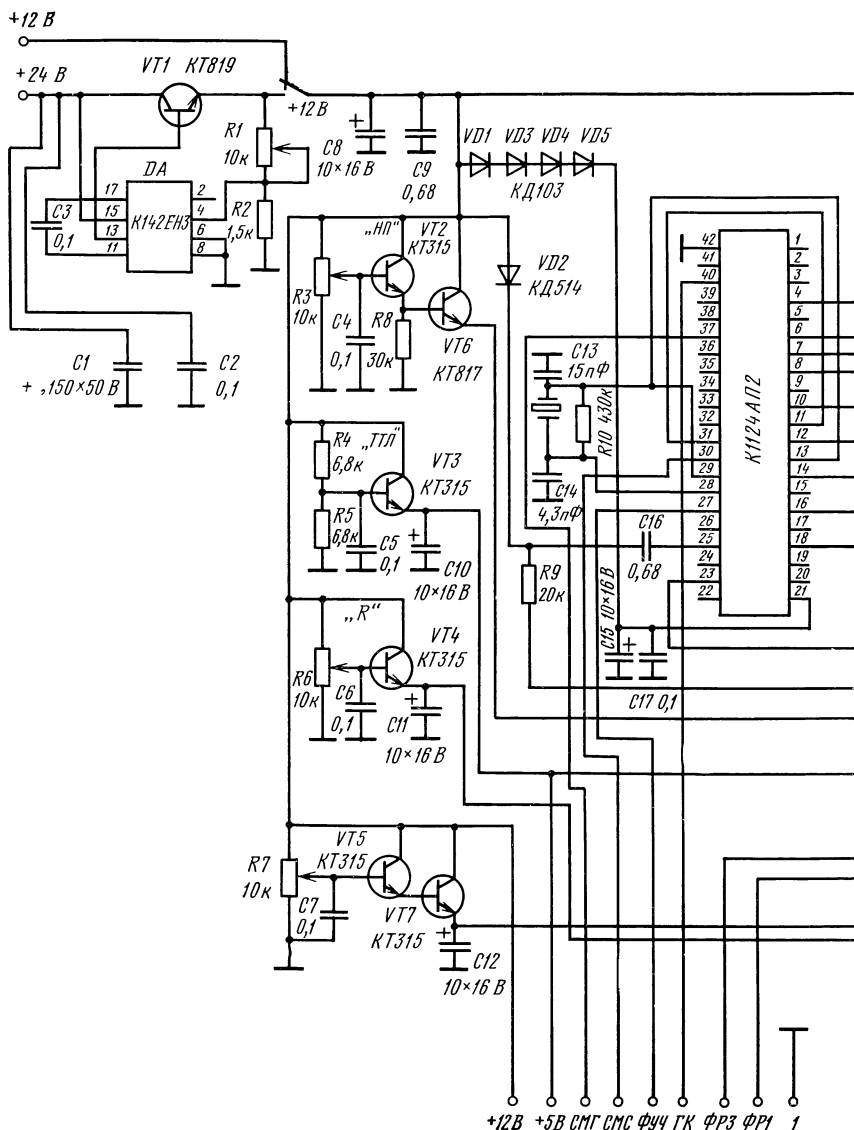
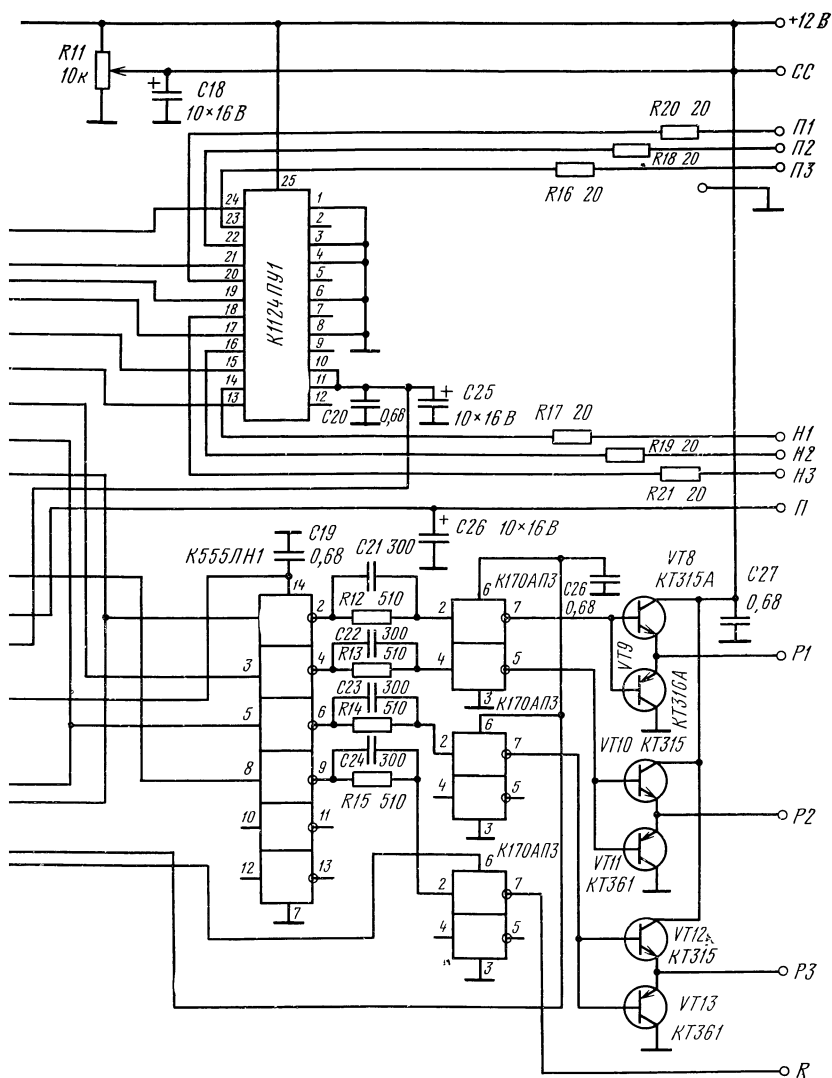


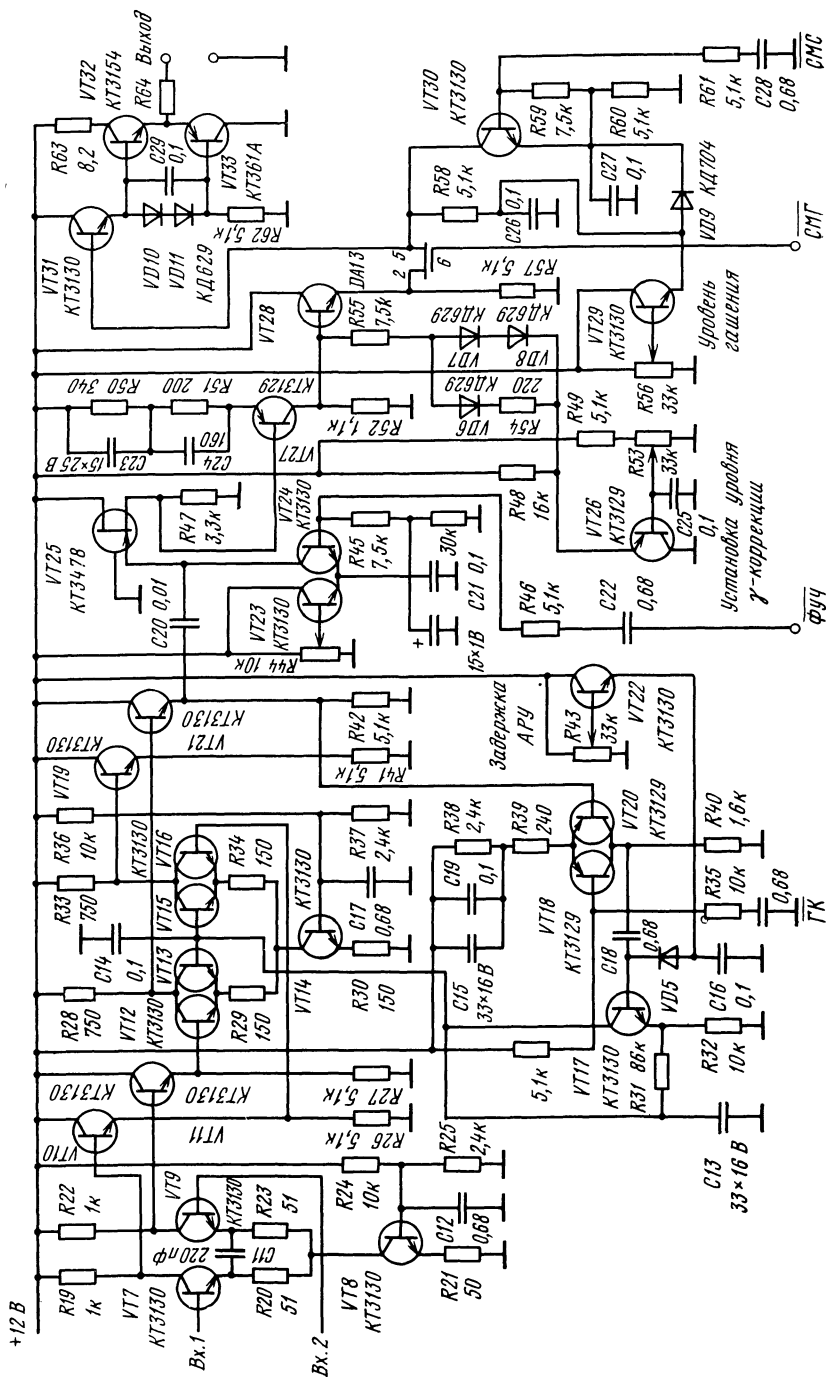
Рис. 5.14. Принципиальная схема ТВ-камеры на трех БИС (ФПЗС типа К1124ПУ1):

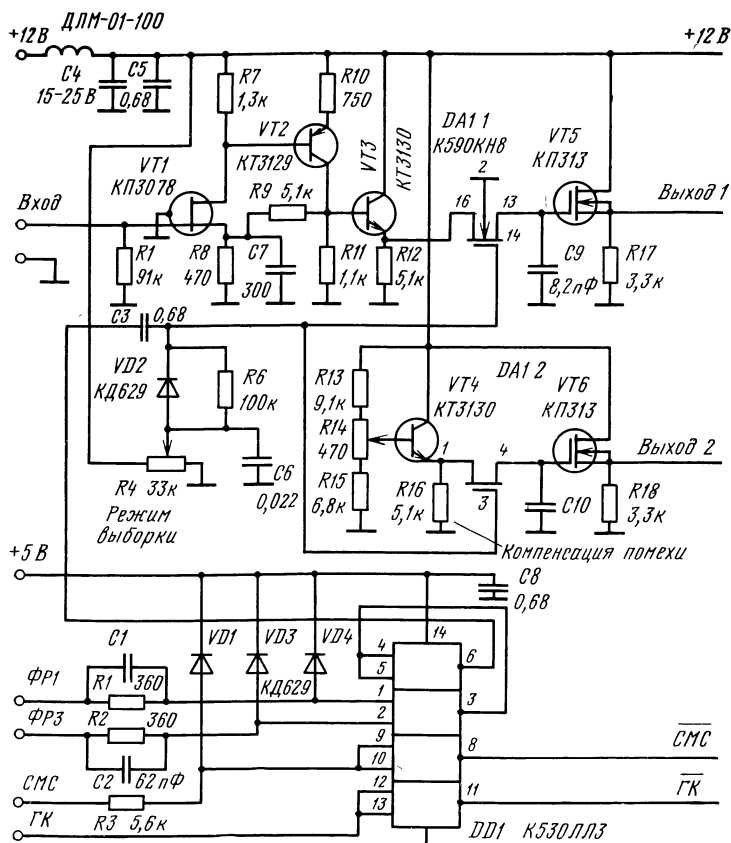
СМГ, СМС — смесь гасящих и синхрипульсов; ФУЧ — импульс фиксации уровня черно-ра; Н, П, Р, Р — регулировка уровней импульсов, управляющих секциями накопления и



К1200ЦМ7, БИС синхрогенератора типа К1124АП2 и БИС преобразователя

го; ГК — кадровый гасящий импульс, ФР1, ФР3 — импульсы первой и третьей фаз регистра, затвором транзистора сброса и выходным регистром

 α



б)

Рис. 5.15. Принципиальная схема выборки-хранения (а) и видеоканала (б) миниатюрной ТВ-камеры на трех БИС

плат, соединяемых плоским ленточным кабелем марки ЛФ с шагом проводов 0,125 мм.

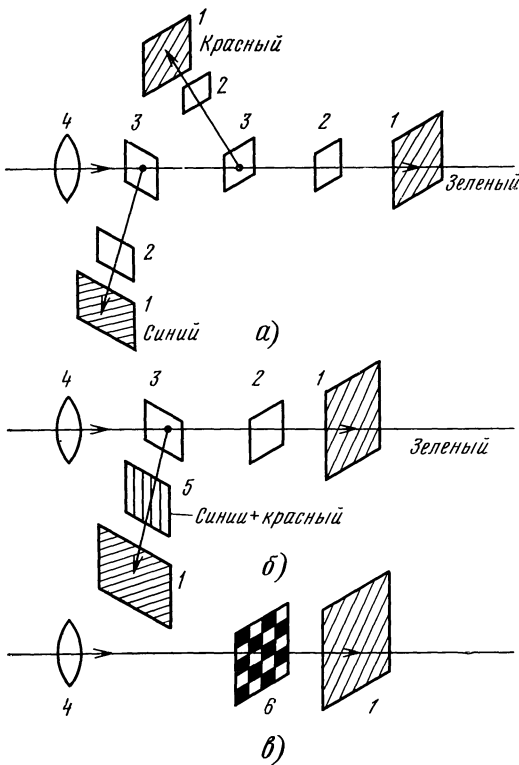
Технические характеристики ТВ-камеры:

Разрешающая способность при освещенности более 30 лк,	
ТВ-линий	270 ... 300
Пороговая освещенность, лк	Порядка 1
Потребляемая мощность, Вт	Менее 2

В ТВ-камере цветного изображения к ФПЗС предъявляется дополнительное требование — верность цветопередачи. Сами ТВ-камеры намного сложнее черно-белых. Возможны три схемы компоновки цветной ТВ-камеры. В применяемых для студийных съемок высококачественных камерах используют трехматричную кон-

Рис. 5.16. Типы компоновки
цветных телекамер на
ФПЗС:

а — трехматричная; *б* — двух-
матричная; *в* — одноматричная



струкцию (рис. 5.16, *а*, где 1 — ФПЗС; 2 — сплошной светофильтр; 3 — разделение цветов; 4 — объектив; 5 — полосчатый светофильтр; 6 — ячеистый светофильтр). Перед каждой из матриц установлен сплошной цветной фильтр. Сочетания цветов могут быть различными (более 100 вариантов), к основным цветам относятся зеленый, красный и синий. Матрица в зеленом канале формирует видеосигналы четкости, от нее требуется максимально высокое разрешение. Матрицы в синем и красном канале могут иметь разрешение в четыре раза меньше, т. е. они не используются полностью, — имеется в виду, что применяются матрицы одного формата.

Двухматричная конструкция (рис. 5.16, *б*) уравнивает требования к разрешающей способности матриц. Одна матрица работает в зеленом канале так же, как и в трехматричной камере. Перед второй матрицей установлен не сплошной фильтр, а полосчатый или ячеистый кодирующий светофильтр — в зависимости от того, какого типа матрицы используются, с переносом кадра или со строчно-кадровым считыванием. В таком кодирующем светофильтре числа полей или ячеек красного и синего цвета равны, и все элементы матрицы в красно-синем канале участвуют в формировании цветного изображения. Двухматричная конструкция, одна-

ко, оказалась малоперспективной, так как, с одной стороны, требует почти такой же сложной, как и в трехматричной камере, системы точного сведения изображений, формируемых матрицами в разных каналах, а с другой — нуждается в специальном кодирующем светофильтре. Гораздо привлекательнее выглядит одноматричная схема (рис. 5.16,а), наиболее подходящая для создания недорогих цветных камер. На схеме рис. 5.16,б показан ячеистый кодирующий светофильтр, хотя широко используют и полосчатые светофильтры, в зависимости от типа матрицы. В малокадровом телевидении применима одноматричная камера последовательного типа с вращающимся диском, в отверстия которого вставлены зеленый, синий и красный фильтры.

Основное внимание разработчиков в настоящее время обращено на создание одноматричных цветных камер. Простота одноматричной конструкции достигается при усложнении светофильтра, изготовление которого выливается в самостоятельную проблему. Кодирующие светофильтры подразделяются по типу технологии на интерференционные и адсорбционные (т. е. на основе красителей, адсорбирующих излучение в заданном диапазоне длин волн), по конструктивному исполнению — на отдельные и формируемые непосредственно на поверхности матрицы, по системе кодирования — на фильтры в основных и дополнительных цветах. В отечественной практике применяются отдельные полосчатые светофильтры, что объясняется типом используемых матриц и нежеланием усложнять их технологию. В [96] описана разработка интерференционного фильтра, кодирующего в основных цветах. Для напыления слоев с высоким коэффициентом преломления использовался диоксид гафния, слои с низким коэффициентом преломления получали напыление диоксида кремния. Число слоев в красном фильтре — 31, в синем — 25, зеленом — 28. Режимы напыления рассчитывались на ЭВМ, относительное среднеквадратичное отклонение спектральных характеристик от заданных не превышало 10...12%. В [97] интерференционный фильтр с дополнительными цветами (прозрачная, желтая и зеленая полосы) получен напылением слоев диоксида кремния и ниобия.

Сложной операцией является совмещение и последующая склейка кодирующего светофильтра с матрицей, точность совмещения должна быть порядка 1,5 мкм. Для облегчения этой операции и снижения перекрестных цветовых искажений, особенно больших для матриц с кадровым переносом в горизонтальном направлении, фильтр содержит непрозрачные разделительные полосы.

Структурная схема одноматричной цветной камеры отличается от схемы черно-белой камеры следующими блоками:

выборки и хранения цветовых составляющих, обеспечивающим разделение закодированных светофильтром сигналов. Построение блока определяется типом кодирующего светофильтра (например, при использовании мозаичного светофильтра с основными цветами и удвоенным числом зеленых ячеек применяют четыре линии за-

держки на строку, зеленый сигнал задерживают два раза). Для фильтра с дополнительными цветами необходимо включить схему декодирования:

баланса белого, в котором нормализуются коэффициенты усиления каналов основных цветов. Здесь же осуществляется привязка к уровню черного;

матрицирования, формирующим яркостный и цветоразностные сигналы по зеленой, красной и синей составляющим;

кодером, осуществляющим модуляцию поднесущих и формирование полного цветного ТВ-сигнала.

Достаточно качественное цветное изображение было получено [97] на модифицированной матрице типа ФПЗС-4М с кодирующим полосчатым (прозрачная — желтая — зеленая полосы) светофильтром. Для формирования изображения использовали автоматизированную измерительную систему с программой, обеспечивающей получение из цветокодированных сигналов красной, синей и зеленой составляющих, последующую их обработку и демонстрацию на цветном ВКУ с помощью трех ЗУ емкостью $512 \times 512 \times 8$ бит. Модификация матрицы заключалась в создании объемного канала p -типа, обеспечивающего малые потери переноса (это особенно важно в выходном регистре, где может наблюдаться перемешивание цветов из-за ухудшения переноса на высокой частоте) и охлаждения ее двухкаскадной термоэлектрической батареей. Разрешающая способность цветного изображения составила 270 ... 300 ТВ-линий, коэффициенты перекрестных помех не превышали 10 ... 15 %.

Отмечается перспективность применения кодирующего светофильтра с голубыми, желтыми и зелеными полосами. Такой светофильтр легко изготовить, так как голубая полоса образуется сочетанием желтого и зеленого цветов, светопропускание фильтра выше, чем у фильтра с основными цветами. Кроме того, в каждой полосе присутствует зеленая составляющая, что повышает четкость и облегчает декодирование.

Специализированные малокадровые ТВ-камеры находят широкое применение в прикладном телевидении в первую очередь из-за того, что их легко согласовать с ЭВМ по быстродействию. В малокадровой камере возможно применение механического или электронного затвора, позволяющих уменьшать время накопления до 10 ... 100 мс при длительности кадра 1 с и более. У матрицы с переносом кадра в малокадровом режиме может быть использована в качестве фоточувствительной вся поверхность кристалла, в результате чего разрешающая способность по вертикали удваивается. При этом возникает «смаз» изображения в виде вертикальных тянучек за белыми деталями. В [98] предложены способы уменьшения смаза, в частности, путем вертикальной ВЧ-фильтрации и инжекции зарядов в подложку перед началом цикла накопления. Требования к темновым токам ФПЗС, работающего в малокадровой камере, резко повышаются. Во многих случаях применяют охлаждение. Например, охлаждение до -40°C обеспечи-

вает работу малокадровой камеры со временем накопления до минуты. Подробное описание малокадровой ТВ-камеры на матрице типа К1200ЦМ7 приведено в [99], отличительная черта камеры — возможность снятия видеоинформации не со всей матрицы, а только с требуемой зоны. В этом режиме камера работает со скоростью 50 ... 100 кадр/с при сохранении частоты считывания в пределах 100 ... 250 кГц.

Примерами специализированных камер, обеспечивающих получение межкадровой разницы, служат камеры на двух матрицах типа К1200ЦМ1 [99] и на матрице типа К1200ЦМ8 с универсальным средним регистром [100]. В первом случае максимальная ошибка вычитания составляла 2%, динамический диапазон был равен 200. Применение матрицы с универсальным регистром, отличающейся высокой степенью идентичности обеих секций (см. гл. 4), позволило уменьшить в 2 раза ошибку вычитания и поднять до 500 динамический диапазон.

5.3. Системы технического зрения

Чаще всего системы технического зрения (СТЗ) связывают с робототехникой, в которой для них действительно находится широкое применение. Класс СТЗ намного шире, так как в него могут быть включены любые системы восприятия и переработки визуальной информации. Обобщая, можно сформулировать три основные области применения СТЗ:

- количественный и качественный контроль — измерение размеров и перемещений, контроль качества;

- идентификация объектов (например, сравнением с эталонным образцом);

- управление исполнительным органом (рукой робота, сварочной головкой, зажимом с инструментом в станке и т. д.).

Структурно СТЗ состоит: из ТВ-камеры; устройства предварительной обработки видеосигнала; ЭВМ или вычислителя, в котором осуществляется логико-математическая обработка данных и формирование результирующих сигналов; осветителя; синхронизатора, осуществляющего автоматическое включение — выключение СТЗ в необходимые моменты времени (при отсутствии ЭВМ). Решение задачи количественного и качественного контроля намного проще, нежели решение задач идентификации и управления. Очевидно, этим определяется тот факт, что в настоящее время отечественные СТЗ на ФПЗС представлены в основном контрольно-измерительными системами.

Контрольно-измерительные системы. Они решают задачи, которые можно разбить на четыре класса [101]: координатный — определение размеров и формы объекта; координатно-энергетический — одновременное измерение яркости данной точки изображения; координатно-временной — определение пространственного положения объекта во времени; спектральный — в первых двух

классах измерения проводятся в заданном спектральном диапазоне.

При решении практически любой из перечисленных задач необходимо с максимальной точностью определить координаты границы свет — тень либо центра светового пятна. Для повышения точности определения координат применяют различные методы. В первую очередь стремятся увеличить число элементов ФПЗС и уменьшить шаг их расположения. Такой способ полностью удовлетворяет задачи координатного типа. При решении координатно-энергетических задач уменьшение шага невыгодно, так как снижает чувствительность. Наибольшее число элементов достигается использованием линейных ФПЗС и гибридных сборок матриц, работающих в режиме временной задержки и накопления. Эффективным методом является сдвиг центров накопления, поскольку ФПЗС — многофазный прибор с числом фазовых электродов от двух до четырех, то, накапливая носители под разными фазами, можно в 2...4 раза увеличить число отсчетов. В двухрегистровых линейных ФПЗС число координатных отсчетов дополнительно увеличено в результате сдвига (вдоль оси) одного регистра относительно другого; в четырехфазном ФПЗС-1Л при шаге 24 мкм и сдвиге регистров на 1,5 мкм точность координатных измерений составляет 1,5 мкм. Недостатком метода является необходимость использования для накопления сам сдвиговый регистр с электродами, поглощающими излучение, особенно в коротковолновой области. Дальнейшее повышение точности отсчета координат обеспечивается специальными алгоритмами обработки видеоинформации, позволяющими определять координату с точностью до долей размера фоточувствительного элемента (электрода).

При расчете контрольно-измерительных устройств, помимо характеристик и параметров (см. гл. 2 и 4), представляет интерес *апертурная характеристика ФПЗС*, под которой понимают зависимость эффективности сбора носителей заряда, генерированных при проекции светового пятна бесконечно малого размера, от местоположения пятна. Снимают апертурную характеристику следующим образом: проецируют световое пятно диаметром много меньше размера элемента и, смещая пятно с помощью микроманипулятора, измеряют напряжение выходного сигнала [98]. Затем строят зависимость $U=f(x)$ и по уровню выходного сигнала 0,5 определяют ширину апертурной характеристики. Апертурная характеристика включает дрейфовую и диффузионную составляющие, отражающие соответственно эффективность сбора носителей в области пространственного заряда (под электродом) и вне ее. Исследования апертурных характеристик матрицы с переносом кадра показывают [98], что основное влияние оказывают режим работы ФПЗС и длина волны излучения. Для длин волн менее 0,6 мкм апертурная характеристика может быть аппроксимирована прямоугольником, ширина которого примерно равна размеру элемента. При больших длинах волн влияние диффузии носителей заряда приводит к увеличению ширины апертуры. Ширина апертур-

ной характеристики вдоль строки матрицы Δx мало зависит от режима. Ширину поперек строки Δy , напротив, можно изменять, подавая на накапливающие электроды смещение аккумуляции. Ширина апертуры при аккумуляции уменьшается. Зная апертурные характеристики и распределение света в спроецированном на ФПЗС пятне, можно определить координату пятна с высокой точностью. Для этого световое пятно должно попадать на несколько элементов ФПЗС, сигналы с которых сравниваются между собой. Существует несколько способов анализа сигналов [98] с целью нахождения координаты центра проекции пятна. Например, за координату центра проекции светового пятна принимается координата центра тяжести \hat{x}_0 последовательности отсчетов сигнала U_i , определяемая из выражения: $\hat{x}_0 = \frac{\sum_i x_i U_i(t_i, x_0)}{\sum_i U_i(t_i, x_0)}$, где x_i — координата i -го отсчета; t_i — момент i -го отсчета; U_i — амплитуда сигнала i -го отсчета; x_0 — истинная координата светового пятна [98].

Различие между измеренными координатами центра тяжести последовательности отсчетов и центра светового пятна будет зависеть от размера светового пятна, взаимного расположения пятна и считывающей апертуры, а также от потерь при переносе. В [98] исследована точность измерения координаты светового пятна с помощью матрицы K1200ЦМ7, имеющей размер элемента 18×19 мкм. При площади проекции светового пятна, равной примерно 3×3 элемента, среднеквадратическая ошибка измерения координаты составила 1...2 мкм, причем основной причиной снижения точности явилась неэффективность переноса. По оценкам авторов, потенциальная точность, определяемая флуктуационными шумами, достигает сотых долей элемента, реально систематическая ошибка равна десятым долям размера элемента.

Разработчик СТЗ и контрольно-измерительной аппаратуры для СТЗ выбирает, исходя из конкретных технико-экономических соображений, один из двух методов обработки изображений [102]. Более простой метод, называемый иногда *бинарным*, заключается в оценке видеосигнала терминами «белый» или «черный». Переход от аналогового к бинарному видеосигналу производится посредством сравнения амплитуды сигнала с пороговым напряжением, которое может быть постоянным либо скользящим, с помощью аналогового компаратора. Сигнал с компаратора разделяет свет и тень. Бинарный метод требует точной фокусировки изображения. Точность бинарного метода невелика — в лучшем случае при резкой границе свет — тень и малой неэффективности переноса она составляет один элемент ФПЗС. Помимо этого, метод требует подобранного стабильного освещения, не позволяет работать с малококонтрастными объектами. Достоинство метода — простота реализации, требуется только подсчитать число импульсов, соответствующих светлоте или темноте участкам изображения.

Второй метод основан на *оцифровке аналогового видеосигнала с помощью АЦП* той или иной разрядности. При этом появляется

возможность работать не только с резким, но и с полутоновым изображением. Используя, например, восьмиразрядный АЦП, можно измерять до 256 градаций черно-белого. Это означает гораздо большую свободу в выборе освещения и характере объекта. После АЦП получают комбинации лог. 1 и 0, для обработки которых используют различной сложности алгоритмы. Приведенный пример измерения координат с точностью до десятых долей размера элемента основан на применении такого алгоритма. Примерами реализации бинарного метода служат разработки автомата измерений диаметра поликристаллов кремния [103], оптико-электронного микрометра ОЭМ-1 [104], модульной системы контроля деталей в машиностроении [88], бесконтактного измерителя размеров [105].

В автомате измерения диаметра поликристаллов кремния видеосигнал с линейного ФПЗС типа К1200ЦЛ1 после усиления и фильтрации поступает на измерительный компаратор. Он срабатывает на превышение видеосигнала заданной величины, преобразуя таким образом измеряемый размер в число импульсов фиксированной амплитуды. Эти импульсы поступают на масштабирующий усилитель и затем на динамический измерительный счетчик, который осуществляет подсчет импульсов за время считывания одной строки. В конце строки измеренное число импульсов передается в регистр памяти и далее на цифровой индикатор. Предусмотрен блок автоматической стабилизации амплитуды видеосигнала, в котором амплитуда сравнивается с заданным значением. Сигнал разбаланса используется для регулирования времени накопления ФПЗС. Автомат предназначен для непрерывной работы в течение 10...15 суток. При шестикратном изменении светимости слитка абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,2$ мм в диапазоне 5...80 мм. Двухлетняя непрерывная эксплуатация автомата подтвердила высокую его надежность: не наблюдалось ни отказов, ни ухудшения метрологических характеристик.

Оптико-электронный микрометр состоит из двух измерителей на линейных ФПЗС типа К1200ЦЛ1, аналогичных описанному. Измерители установлены один над другим на вертикальном штативе, напротив них на таком же штативе расположены два осветителя. Между штативами на подставке помещено измеряемое изделие, например вал. Верхняя и нижняя границы изделия должны перекрывать пучки света от осветителей. Координаты границы свет — тень регистрируются линейными ФПЗС. Метод измерений предусматривает первоначальную калибровку по изделию с известным размером (эталон). Устанавливают эталон и обнуляют показания индикатора установочными счетчиками контроллера. После калибровки микрометр показывает отклонение и знак отклонения от эталона. Наибольшая абсолютная погрешность микрометра $\pm 0,01$ мм в диапазоне 60...200 мм. Результаты измерений в виде двоично-десятичного кода, а также граничные управляющие сигналы (типа «годен», «брак на доработку») могут направляться в систему ЧПУ.

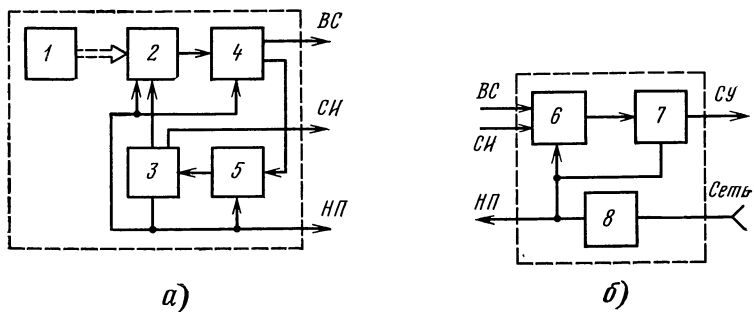


Рис. 5.17. Структурная схема модульной СТЗ разработки ЭНИМС: телекамеры (а) и контроллера (б):

1 — оптико-механический блок; 2 — ФПЗС; 3 — тактовый генератор; 4 — видеоусилитель; 5 — автоматическая регулировка чувствительности; 6 — блок логико-математической обработки; 7 — блок вычисления и индикации; 8 — источник питания; ВС — видеосигнал; СИ — синхроимпульсы; НП — напряжение питания; СУ — сигнал управления

Модульная система контроля размеров и положения деталей для машиностроения разработана в Экспериментальном научно-исследовательском институте металлорежущих станков (ЭНИМС). В ней используются ТВ-камеры на линейных ФПЗС типа К1200ЦЛ1, 2, К1200ЦЛ5, 6 и матричных ФПЗС типа К1200ЦМ7. На рис. 5.17,а схематически показаны модули: осветитель, телекамера и контроллер. Контроллер (рис. 5.17,б) содержит блок логико-математической обработки, блок вычисления, а также стабилизированный источник питания. В зависимости от поставленной задачи в блоке обработки можно выделить светлую либо темную часть изображения или середину темной части. Кроме того, в нем предусмотрено мультиплексирование, позволяющее контроллеру работать с несколькими телекамерами. Сигнал с выхода СУ контроллера может использоваться для управления захватами деталей, станками и др. Система позволяет со стандартными объективами измерять одной ТВ-камерой с расстояния до 500 мм отклонение размера фиксированной детали от номинала с абсолютной погрешностью $\pm 0,001$ мм при интервале измерений ± 1 мм ($\pm 0,01$ мм при интервале $\pm 2,5$ мм), расстояния до 5 м — размер с точностью $\pm 0,1\%$, то же — двумя камерами при невозможности фиксации детали относительно опорной базы; контролировать с относительной погрешностью 0,5% пространственное положение светлого или темного объекта относительно телекамеры (например, отверстия в плате); контролировать с точностью $\pm 1\%$ положение края проекции объекта относительно базы; контролировать разметку заготовок и качество деталей, например резьбы на винтах и гайках. Автоматическая стабилизация амплитуды видеосигнала обеспечивает точность поддержания амплитуды $\pm 5\%$ при изменении освещенности объекта до 10^4 раз.

Устройство для измерения линейных перемещений имеет несколько более сложную электронную часть [106]. Подвижная часть устройства (рис. 5.18), включающая жест-

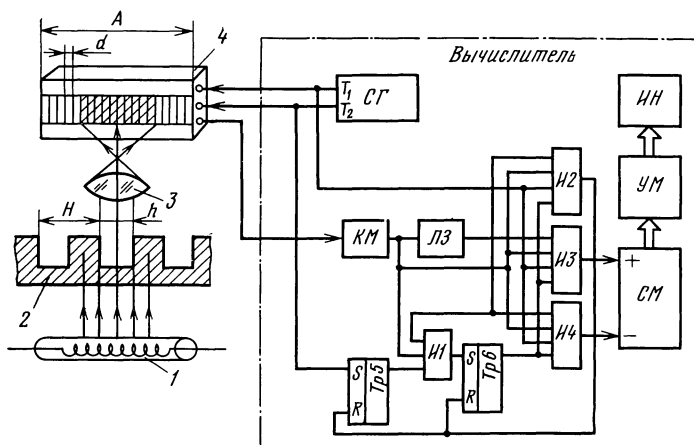
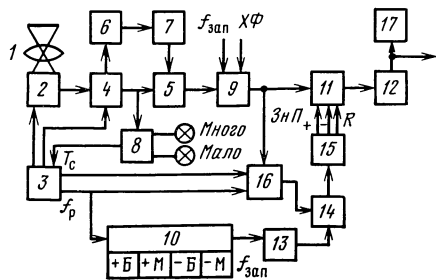


Рис. 5.18. Структурная схема устройства для измерения линейных перемещений

ко связанные осветитель 1, объектив 2 и линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ1, перемещается вдоль зубчатой рейки 4. Прорезы рейки проецируются на фоточувствительную область. Свет, проходя сквозь прорезы рейки, вызывает появление пачки видеоимпульсов на выходе ФПЗС. Если производить два считывания в разное время, то по перемещению пачки можно, зная шаг d элементов ФПЗС и коэффициент уменьшения (увеличения) объектива K , определить истинное смещение прорезей рейки. Шаг прорезей H рейки выбран таким, чтобы его проекция была меньше длины A фоточувствительной области ФПЗС. Длина перемещения рейки за время между двумя считываниями не должна превышать ширину прорези. При длительности накопления T максимальная скорость перемещения рейки v и, следовательно, минимальное время измерений определяется условиями: $h = H/2$; $H = 2A/3K'$; $v < A/3TK'$, где $K' = K \cos \alpha$; α — угол между осью ФПЗС и направлением движения рейки, его следует учитывать при их несовпадении. В блок управления и вычислителя входят: синхрогенератор СГ, компаратор КМ, линия задержки ЛЗ, логические элементы И1—И4, триггеры Тр5, Тр6, блоки суммирования СМ и умножения УМ.

Синхрогенератор вырабатывает импульсы считывания информации из фотоячеек в регистр с периодом T_1 и тактовые импульсы регистра с периодом T_2 . Линия задержки задерживает сигналы, поступающие с КМ, на время, равное периоду импульсов T_1 , так что на входе и выходе ЛЗ появляется информация о состоянии одной и той же ячейки ФПЗС, но со сдвигом на период считывания в регистр. Триггеры Тр5 и Тр6 находятся в нулевом исходном состоянии. Импульс T_1 перебрасывает триггер Тр5, на его выходе появляется лог. 1. Триггер Тр6 перебрасывается в состояние единицы на выходе импульсом с логического элемента И1. Этот импульс появляется, когда на элемент поступают сигналы с КМ (текущее

измерение) и выхода ЛЗ (предыдущее измерение). При смещении прорези рейки в одну сторону появится импульс T_2 на выходе элемента ИЗ, при смещении в другую сторону — на выходе элемента И4. В первом случае импульсы счета будут сумматором прибавляться, во втором — вычитаться. Если с КМ и ЛЗ сигналы не поступят, на выходе элемента И2 появится импульс T_2 и установит триггеры в исходное нулевое состояние. При отсутствии смещения рейки за время между двумя считываниями сигналы на выходах элементов ИЗ и И4 не появятся. Блок УМ обеспечивает масштабирование, т. е. на его выходе появляется число в единицах перемещения. Экспериментальная проверка устройства с объективом, имеющим коэффициент увеличения 0,38, и рейкой с шагом $(30 \pm \pm 0,5)$ мм и максимальной высотой микронеровности края прорези 250 мкм при перемещении 600 мм со скоростью 10...20 мм/с показала, что среднеквадратическая ошибка (180 измерений) составляет примерно 200 мкм. Снижение микронеровности края прорези шлифовкой до высоты 10 мкм позволяет уменьшить ошибку до 50 мкм.



импульсами заполняется прямой или инвертированный сигнал с выхода компаратора. Реверсивный счетчик 11 считывает импульсы заполнения и передает результат в блок грубой установки масштаба 12, в котором осуществляется деление на целые степени числа 2. Точная установка масштаба производится изменением частоты генератора 10. В данной схеме частота $f_{\text{зап}}$ определяется кодом, устанавливаемым кнопками быстрого и медленного изменения частоты (+Б, +М, —Б, —М). Через делитель 13 и ключ 14 импульсы заполнения с измененной частотой попадают в блок управления счетчиком 15, который вносит поправку в результат. Знак поправки ЗНП выдается корректором 16; входные сигналы корректора зависят от положения переднего и заднего фронтов импульса компаратора. Результаты измерений поступают на индикатор 17.

С использованием принципа ВЧ заполнения выполнен измеритель ширины горячей полосы проката [108]. В нем использованы две телекамеры на линейном ФПЗС типа К1200ЦЛ1, каждая из которых контролирует свой край полосы. Погрешность измерения 0,3 мм в диапазоне 60 ... 300 мм при вертикальных колебаниях полосы проката в зоне измерения ± 10 мм, горизонтальном смещении полосы ± 20 мм, толщине полосы 2 ... 12 мм, изменении температуры 800 ... 1100 °С. Внедрение ФПЗС позволило отказаться от механических сканаторов со сложной системой позиционирования фотоголовок, снизить массу измерителя примерно в 7 раз, достичь высоких метрологических характеристик.

Наиболее широко в современных СТЗ на ФПЗС используется метод обработки видеосигнала с применением АЦП. Примерами реализации служат: многоканальная система регистрации спектра [109]; СТЗ для автоматизированного комплекса фрезерной ячейки [110]; установка контроля оптических элементов ЭЛП и ФЭП [112]; система измерения линейных перемещений для станков с ЧПУ [111], автоматический кодировщик осциллограмм [113].

Многоканальная система регистрации спектра выполнена в качестве приставки к спектрографу «Спектр» на линейном ФПЗС типа «Квант-2», содержащем 794 фотодиода размером 12×500 мкм. Линейный размер изображения 9,53 мм. Это позволяет одновременно регистрировать спектральный интервал 22 нм в диапазоне 370... 530 нм и 32 нм в диапазоне 520... 750 нм. Фотоэлектрический преобразователь устанавливается на место кассеты спектрографа, платы управления и обработки видеосигнала расположены в каркасе микроЭВМ «Электроника-60». Ввод рабочей программы осуществляют с пишущей машинки «Консул-260». Время накопления регулируется микроЭВМ в пределах 5... 10 мс. Видеосигналы преобразуются АЦП в цифровые сигналы, которые вводятся в микроЭВМ. Она усредняет данные измерений (2 ... 1000 реализаций с вычитанием темнового шума), находит число спектральных линий с интенсивностью выше заданного порога или лежащей в заданных пределах и т. д.

Система технического зрения для фрезерной ячейки состоит: из осветителя, формирующего параллельный пучок света; ТВ-камеры с объективом «Юпитер-3», линейным ФПЗС типа К1200ЦЛ1, блоками управления ФПЗС и аналоговой обработки видеосигнала; измерительного блока, содержащего модули цифровой обработки сигнала, преобразования в параллельный код, индикации результатов измерений, передачи информации в ЭВМ, приема информации из ЭВМ; микроЭВМ «Электроника-60». Осветитель и телекамера расположены на специальном приспособлении непосредственно на фрезерном станке. Вначале проводится настройка СТЗ в ручном режиме: на станок устанавливают последовательно эталонные детали с минимальными и максимальными размерами, результаты эталонных измерений вводят в память ЭВМ; туда же заносят значения допусков на размеры эталонов в миллиметрах. Фрезерный станок в автоматическом режиме обрабатывает деталь, робот переносит деталь на станочное приспособление, деталь измеряется, и ЭВМ сравнивает полученные результаты с эталонными. Если размеры лежат в пределах допуска, работа фрезерной ячейки продолжается, при превышении допуска ЭВМ рассчитывает коррекцию и отражает ее на дисплее, после чего оператор вводит поправки в положение фрезы. Диапазон измеряемых с помощью СТЗ размеров составляет $\pm 6,5$ мм, погрешность измерения ± 1 мкм, время измерения не более 5 мс.

Система измерений линейных перемещений для станков с ЧПУ включает следующие узлы:

восемь ТВ-камер на линейных ФПЗС (по числу измеряемых координат перемещений), фиксирующих распределение интенсивности светового пучка, отраженного от металлической штриховой линейки;

электронно-преобразовательный блок, включающий управление ФПЗС, коммутатор, АЦП, буферное ЗУ, интерфейс связи;

микроЭВМ НМС1210.1, одну на восемь координат.

МикроЭВМ вычисляет центр тяжести распределения интенсивности светового пучка, соответствующий штриху (на ФПЗС проецируются не менее трех штрихов) и по смещению его определяет координаты, скорость и ускорение рабочего органа станка. Погрешность измерений не хуже 1 мкм в пределах шага (1 мм), разрешающая способность 0,1 мкм, стабильность нуля и ошибка реверса не хуже 0,1 мкм. Система может использоваться: для бесконтактного контроля положения вращающихся деталей, зондирования щелей с шагом 10...20 мкм, определения отклонений формы деталей (от круглой) при быстром перемещении; совмещения фотошаблонов и масок. Внедрение системы в станкостроительную промышленность обеспечивает повышение точности обработки в 5—6 раз, производительности труда в 1,5 раза [111].

В системе контроля оптических элементов вводных узлов ЭЛТ и ФЗП использован линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ2. Выбор ФПЗС с большим числом элементов (2048) и малым размером фотоячейки (12 мкм) обусловлен

желанием просматривать широкую полосу на контролируемой поверхности при небольшом увеличении объектива ($2,4\times$), обеспечивающем резкое изображение объектов. Контролируемый оптический элемент в герметичной таре устанавливается на подвижной платформе. Осветитель формирует на поверхности элемента узкую радиальную полосу света, которая после прохождения сквозь контролируемый элемент фокусируется в плоскости ФПЗС, также расположенного радиально. По программе платформа совершает один или несколько оборотов и после каждого оборота смещается в боковом направлении; таким образом просматривается весь элемент.

Система позволяет контролировать элементы диаметром 5...60 мм с разрешающей способностью 5 мкм. В [112] описана полностью автоматизированная установка контроля, являющаяся развитием рассмотренной системы.

Кодировщик осциллограмм, выполненный на матричных ФПЗС типа К1200ЦМ1 и К1200ЦМ7, представляет по сути дела новый класс аналого-цифровых преобразователей, в которых аналоговый сигнал — осциллограмма на экране ЭЛТ — преобразуется с помощью ФПЗС в цифровую последовательность. Функциональная система такого АЦП, превращающего любой осциллограф в цифровой, включает следующие узлы:

матрицу ФПЗС, на которую с помощью оптической системы проецируется изображение с экрана ЭЛТ. Матрица ФПЗС производит дискретизацию и квантование (черный — белый) изображения осциллограммы;

ЗУ, в которое записывается цифровой код координат осциллограммы;

вычислительное устройство, обрабатывающее данные, хранящиеся в ЗУ, и выдающее результат на устройство отображения;

блок синхронизации и управления;

блок сопряжения с ЭВМ;

ЭВМ типа СМ-1.

Кодировщик выдает координаты центра и границ светящейся линии на экране ЭЛТ, причем яркость линии может изменяться в 500 раз. Кодировщик работает в ручном и автоматическом режимах, конструктивно выполнен в виде приставки, надевающейся на экран осциллографа. При использовании матрицы К1200ЦМ7 с числом элементов 576×360 частота дискретизации кодировщика составляет 120 ГГц, что эквивалентно полосе пропускания 40 ГГц (осциллограф С1-97 имеет полосу пропускания 350 МГц). Кодировщик на ФПЗС позволяет решить важнейшие задачи, стоящие перед осциллографической техникой:

автоматизированный контроль параметров осциллографов с верхней границей полосы пропускания до 1 ГГц;

измерение мгновенных напряжений и замена в итоге сложных электронно-лучевых нуль-индикаторов;

считывание с экрана ЭЛТ однократных сигналов наносекундной длительности;

замена в осциллографах обычных ЭЛТ на широкополосные ЭЛТ с малыми габаритными размерами и размерами экрана, со сведенными до минимума геометрическими искажениями.

Последние годы отмечены интенсивным развитием сложных СТЗ, способных выполнять *задачи распознавания образов* и на базе этого анализа управлять исполнительными органами. В 1982 г. появилась одна пионерская разработка — автомат микросварки микросхем [114], а в 1987 г. на 4-м Всесоюзном совещании по координатно-чувствительным фотоприемникам и оптико-электронным устройствам на их основе [115] разработкам СТЗ на ФПЗС была посвящена работа специальной секции. Анализ образов осуществляется одним из трех методов: *сопоставления с эталоном, классификации* (принятие решения) *и синтетическим методом*.

В первом случае используют набор эталонных изображений, с которыми поточно сравнивают анализируемое изображение. Результаты сравнения позволяют судить о принадлежности объекта к тому или иному классу или о наличии у него дефектов (отклонений).

Метод классификации не требует хранения эталонного изображения, решение принимается на основании статистической обработки данных и вычисления многомерных функций плотности вероятности. Основные этапы метода [102]:

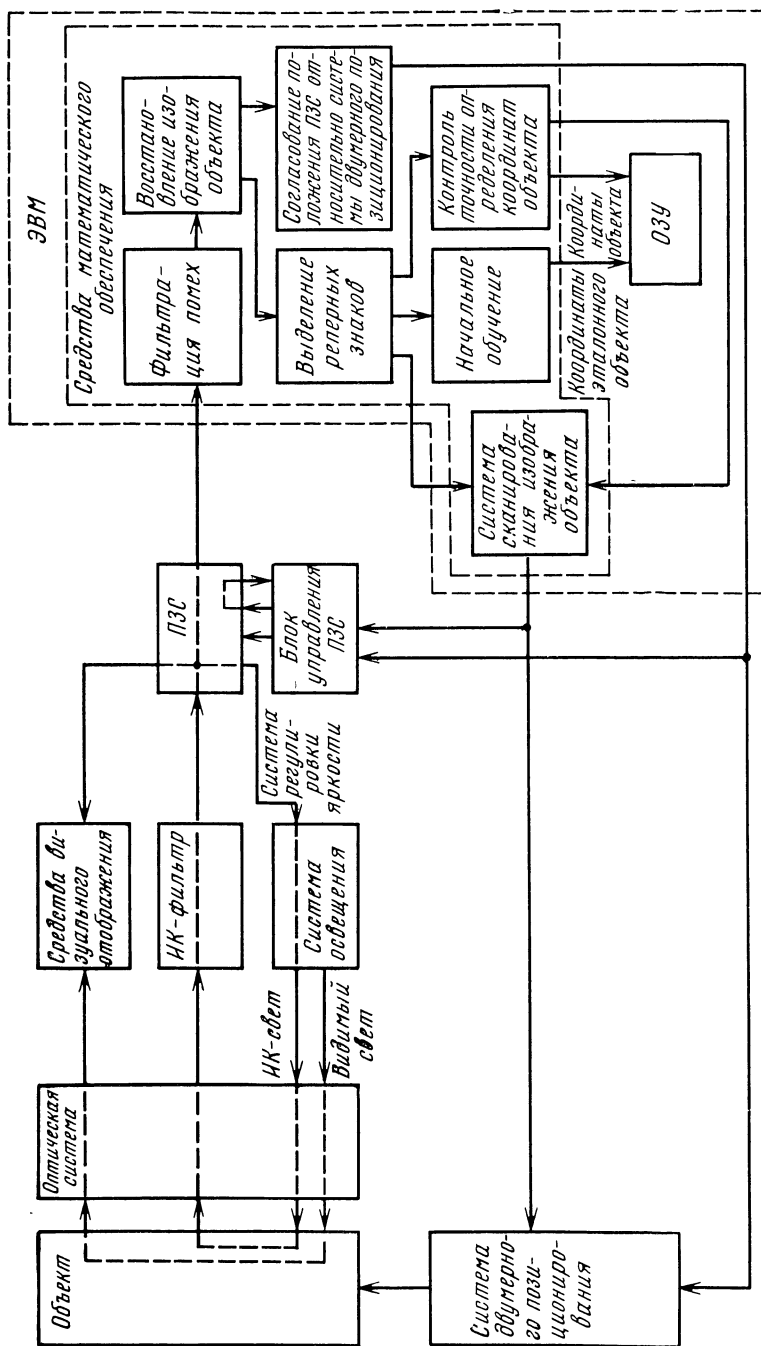
сегментация изображения, т. е. разбиение изображения на образцы, соответствующие разным объектам. Алгоритмы сегментации основаны либо на анализе сходства характеристик соседних элементов изображения, либо на выделении зон резкого изменения этих характеристик;

выделение признаков, инвариантных к положению объектов — площади, параметра, числа отверстий и др. Набор этих признаков составляет описание объекта, по которому проводится классификация;

собственно классификация, которая осуществляется с помощью дискриминационных функций. Распространенные приемы классификации — *метод «ближайшего соседа»* и *метод, основанный на двоичном дереве решений*.

В синтаксических методах для описания объектов используется формальная грамматика, а процесс принятия решения строится на синтаксическом анализе предложенных признаков.

Автомат микросварки микросхем [114] (рис. 5.20) представляет образец, распознающей образы СТЗ. В процессе присоединения выводов микросваркой кристалл размещается на столе с двухкоординатной системой позиционирования и освещается инфракрасным (ИК) и видимым светом; предусмотрена автоматическая регулировка освещенности кристалла. Отраженный световой поток через оптическую систему поступает на устройство визуального отображения (проектор) и через ИК-фильтр — на ФПЗС типа К1200ЦМ1 или К1200ЦМ7. Видеосигнал с ФПЗС квантуется по уровню и в виде цифрового кода передается в ЭВМ.



где производится обработка информации по определенному алгоритму. В результате выделяются реперные метки (находящиеся на кристалле) и по ним определяются истинные координаты кристалла относительно условных осей. Специальным алгоритмом контроля точности проверяют правильность определения координат кристалла, затем по разности координат анализируемого и эталонного кристаллов рассчитывают поправки для каждой координаты. Результаты поступают в систему позиционирования. Перемещение координатного столика осуществляется с учетом поправок по жесткой программе, заложенной в ЭВМ на этапе начального обучения.

Автомат позволяет ориентировать контактные площадки площадью 80×80 мкм с точностью ± 10 мкм. При использовании крупноформатной матрицы типа K1200ЦМ7 точность повышается до ± 3 мкм. На распознавание образа затрачивается 2 ... 2,5 с. В [116] изложена примененная в автомате методика анализа изображений. При анализе изображение описывается в виде бинарной функции (единица соответствует наличию отраженного от кристалла сигнала) и разбивается на сегменты путем выполнения позитивной или негативной маски. В простейшем случае сегментирование представляет собою фильтрацию фона, т. е. выделение фоновых деталей негативной маской: в результате получают прямоугольные изображения контактных площадок на нулевом фоне (без помех от сколов, загрязнений и др.). Изображение кристалла побайтно сравнивают с прямоугольником, выбранным в качестве маски, определяя в итоге координаты центров тяжести двух контактных площадок, принятых за реперные. Поскольку поле зрения ФПЗС больше размеров контактной площадки, приходится выделять все прямоугольники, присутствующие на изображении объекта, анализировать их и находить тот, который соответствует реперной площадке. Если выбранная площадка не попала в поле зрения ФПЗС, то применяют дополнительное сканирование. Для повышения точности используют процесс заполнения пустот на изображении (например, след на контактной площадке от зонда), соединения разорванных линий, исключения случайных точек. Полученная информация заносится в ОЗУ, где уже хранятся координаты двух реперных площадок эталонного кристалла. В [116] приведены два алгоритма анализа местоположения краев прямоугольника и определения соответствующих координат.

В микропроцессорной системе распознавания образов (СРО) использованы ТВ-камера КТП-79 на матрице ФПЗС-2М и микропроцессор КР580ИК80А [117]. При появлении в поле зрения ТВ-камеры анализируемого объекта в ОЗУ в течение одного кадра (20 мс) вводятся координаты контура изображения объекта и параллельно определяются максимальные размеры по кадру и строке, которые затем используются для определения масштаба изображения. По введенным координатам восстанавливается в вычисленном масштабе изображение объекта в виде измерительного массива. По нему находят координаты

центра формы изображения и строят полярную диаграмму изображения для точек контура. Признаки объекта определяются путем анализа экстремумов полярной диаграммы после фильтрации случайных выбросов координат точек контура. К признакам относятся удлиненность объекта $P_1 = b/a$, где b и a — максимальный и минимальный размеры, а также компактность фигуры $P_2 = S/ab$, где S — площадь изображения объекта. Дополнительно можно ввести такие признаки, как число углов или характерная особенность контура (скол, вырыв). Экспериментальные исследования работы СРО показали хорошую устойчивость в условиях изменения освещенности и появления фоновых помех в виде загрязнения ленты конвейера (осуществлялся контроль деталей, находящихся на конвейере в произвольном положении). При формате измерительного массива 64×64 точек погрешность измерения селективного признака составляет примерно 0,01 %, время измерения 0,26 ... 0,34 с.

Аналогичным образом функционируют СРО на основе камеры КТ-2 и микроЭВМ «Электроника-60» [118] и автоматизированная система неразрушающего контроля внешнего вида печатных плат, использующая линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ2 и микроЭВМ «Электроника-60» [119]. В последней применен *двухэтапный метод стохастического анализа восходящего типа*, при котором в ОЗУ предварительно заносится 150 *правильных* двоичных образов по 5×5 элементов, соответствующих областям бездефектной печатной платы. Эти 150 образов отражают 99 % информации. Если анализируемая область не согласуется в точности ни с одним из правильных образов, она отмечается как подозрительная и подвергается дополнительному тестированию: вычислению площади проводника, длины границы проводник — подложка, отношения площади к длине. Поскольку дополнительно тестируют небольшую часть областей, общее быстродействие системы остается высоким.

5.4. Устройства оптико-электронной обработки информации

Линейность преобразования свет — сигнал, малая выходная емкость, большой динамический диапазон — эти свойства особенно важны в ТВ-камерах для формирования качественного изображения. В контрольно-измерительных системах на первый план выступает жесткая, с точностью до долей размера элемента, привязка к координате. Однако наиболее полно специфические особенности ФПЗС, отсутствующие у ЭЛТ, проявляются в новом, быстро развивающемся классе устройств оптико-электронной обработки информации, где на ФПЗС возлагается не только преобразование оптической информации в видеосигнал, но и аналоговая обработка информации. Системы оптико-электронной обработки решают две важные задачи: сопряжение по быстродействию оптического и цифрового способов обработки информации в результате выполнения ФПЗС ряда операций, традиционно выполнявшихся

ЭВМ; снижение избыточности при передаче информации по каналам связи путем спектральной обработки оптического изображения с помощью ФПЗС и фильтрации высокочастотных пространственных составляющих.

Напомним, что ФПЗС не просто преобразует оптическое изображение в видеосигнал, но и осуществляет при этом дискретизацию и фильтрацию. ФПЗС может быть представлен в виде дискретных фотоячеек, расположенных с шагом p . Распределение чувствительности ячейки по x описывается для простоты прямоугольной функцией $S(x)$ шириной Δx , как показано на рис. 5.21,а. Распределение освещенности в пространстве описывается зависимостью $E(x)$ на рис. 5.21,б, причем эту зависимость можно выразить через набор гармонических составляющих, полученных разложением в ряд с использованием синусоидальных функций (ряд Фурье) или каких-либо других функций, скажем, более простых функций Уолша, в которых вместо синусоид используется меандр со значениями амплитуды, равными ± 1 . Такая замена распределения по x распределением по пространственным частотам показана на рис. 5.21,д. В области x взаимодействие оптического сигнала $E(x)$ с ячейками чувствительностью $S(x)$, отстоящими на шаг p , равнозначно тому, что от $E(x)$ берутся выборки дельта-функциями с периодом p (рис. 5.21,в). Амплитуды сигналов выборок на выходе ФПЗС соответствуют (рис. 5.21,г) дискретным значениям функции $E(x)$, и по ним она может быть вос-

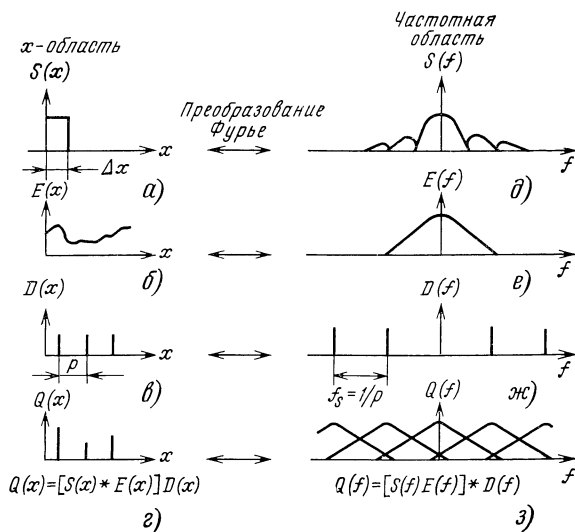


Рис. 5.21. Процесс выборки в координатной (x -область) и пространственно-частотной областях:

а — функция чувствительности $S(x)$ ячейки шириной Δx ; б — распределение освещенности $E(x)$ вдоль координаты x ; в — дельта-функция $D(x)$ с периодом p ; г — выборки на выходе ФПЗС $Q(x)$; д — функция чувствительности $S(f)$ ячейки в области пространственных частот; е — распределение освещенности $E(f)$ в области пространственных частот; ж — дельта-функции $D(f)$ с периодом $1/p$; з — разложение по пространственным частотам сигнала на выходе ФПЗС

становлена, если только не содержит пространственных частот, больших, чем $1/2p$. В частотной области чувствительность ячейки представлена на рис. 5.21,е функцией $S(f)$. Аналогично области x происходит умножение $H(f)S(f)$, но выборки отстоят друг от друга не на p , а на интервал $f_n=1/p$, где f_n — пространственная частота данного ФПЗС с шагом ячеек p (рис. 5.21,ж). Итогом является повторение через $1/p$ произведения $H(f)S(f)$, как показано на рис. 5.21,з.

Фильтрация, происходящая в ФПЗС, связана с тем, что выборки не являются дельта-функциями, так как ячейки имеют протяженность и измеряется интеграл от интенсивности освещенности в ячейке. Кроме того, из-за потерь при переносе зарядов происходит частичное смещение информации с соседних ячеек. Это приводит к тому, что в реальном ФПЗС выборка представляет не истинное значение исходной функции $E(x)$, а скорее, значение первой гармоники, — высокочастотные составляющие фильтруются, т. е. ФПЗС действует как фильтр низкой частоты.

Параметрами дискретизации и фильтрации в ФПЗС можно управлять, что ценно для систем оптико-электронной обработки. Осуществляется управление следующими способами: фильтрацией оптического изображения на входе ФПЗС путем применения масок; изменением амплитудных характеристик ФПЗС путем задания режима аккумуляции на некопящих электродах и объединения ячеек в группы; управлением ЧКХ посредством обработки в выходном устройстве (например, дифференцирование или интегрирование видеосигнала).

К преобразованию свет-сигнал добавляется аналоговая обработка оптической информации. Тенденция разработок систем оптико-электронной обработки собственно и заключается в том, чтобы в максимальной степени аналоговую обработку произвести на кристалле ФПЗС. Примером полной обработки на кристалле служит матрица 1200ЦМ8 с универсальным средним регистром (см. гл. 4), осуществляющая эффективным способом получение межкадровой разности без применения обычных цифровых ЗУ с памятью на кадр. В приборах с инжекцией заряда (ПЗИ) поэлементное считывание, характерное для ПЗС, может быть заменено *интегральным считыванием*, при котором осуществляется суммирование сигналов с разных ячеек с использованием функций Уолша.

Выигрыш в скорости обработки при переходе к преобразованиям Фурье или Уолша может быть весьма значительным. Представление об этом дает следующий пример: при восстановлении изображения медицинских томограмм, содержащих 256×256 элементов, использование поэлементного метода требует $42 \cdot 10^9$ операций умножения, в то время как применение прямого фурье-преобразования — всего $4,2 \cdot 10^6$ операций [120]. Очевидно, что среднеформатные ПЗИ с числом элементов около 128×128 были бы незаменимыми приборами для пространственного спектрального анализа изображений.

В [121] предложен оригинальный способ фильтрации высоких пространственных частот непосредственно на кристалле. В выходной регистр ПЗС сбрасывается из матрицы строка, после чего на короткий момент все электроды регистра переключают на одинаковое смещение высокого уровня. За это время зарядовые пакеты частично размываются, и когда регистр переводится в режим считывания, на выходе появляется сигнал, у которого исчезли высокие пространственные частоты. Степень фильтрации регулируется временем нахождения регистра в режиме общего для всех фаз смещения.

Использование ПЗС для аналоговой обработки на самом кристалле, как мы видим, пока что ограничено. Гораздо шире применяется обработка оптического изображения внешними цифровыми средствами. В таких оптико-электронных системах ФПЗС играет чаще всего роль буферного устройства, обеспечивающего сопряжение сравнительно медленных АЦП и ЭВМ с оптической частью, способной за короткий промежуток времени, например за время телевизионного кадра (40 мс), сформировать $10^5 \dots 10^6$ элементов изображения. Примерами подобных систем служат корреляторы и анализаторы спектра на ФПЗС, в которых часть функций обработки — дискретизация, интегрирование во времени, фильтрация, параллельный ввод информации — возложена на ФПЗС. Часть функции выполняет ЭВМ — это управление режимами работы ФПЗС и апертурной характеристикой, цифровая обработка видеосигнала после АЦП.

Структурная схема оптического коррелятора с опорной маской показана на рис. 5.22. Анализируемый входной сигнал $S(t)$ модулирует интенсивность излучения полупроводникового лазера 1. Линза 2 формирует равномерный световой пучок, проходящий сквозь маску 3, на которой записана библиотека опорных сигналов $R_1(x) \dots R_m(x)$. Маска представляет собою набор столбцов, соответствующий числу столбцов матрицы ФПЗС (в случае применения линейного ФПЗС маска содержит один столбец). Вдоль каждого столбца записан в виде распределения оптической плотности опорный (эталонный) сигнал $R(x)$. В [122] использовалась, например, опорная маска в виде покрытой хромом стеклянной пластинки, на которой методом фотолитографии были сформированы расположенные на различных расстояниях штрихи, представляющие запись псевдослучайных последовательностей длиной 255 эле-

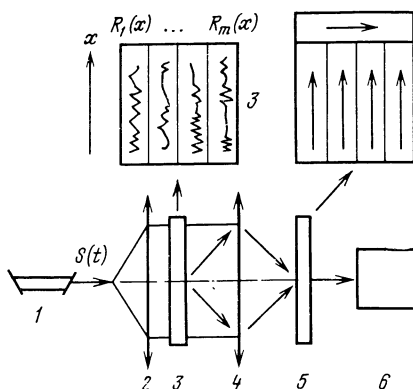


Рис. 5.22. Структурная схема оптического коррелятора, использующего матричный ФПЗС и опорную маску

ментов. Линза 4 отражает маску на матричный ФПЗС 5, работающий в режиме непрерывного сканирования; направление сканирования совпадает с направлением столбцов маски. Выходной сигнал ФПЗС подается на вычислитель 6, в котором определяется, присутствуют ли в анализируемом сигнале эталонные последовательности. Описанный коррелятор позволяет получить дискретизированные во времени отсчеты корреляционных функций обрабатываемого и эталонных сигналов. Отсчеты корреляционной функции будут определяться количеством элементов в столбце ФПЗС, размером элемента (действующей апертурой) и скоростью сканирования. Из известной *теоремы дискретизации* выводится ограничение работы коррелятора $\Delta\omega_c T_c < N/2$, где $\Delta\omega_c$ и T_c — полоса частот и длительность анализируемого сигнала; N — число элементов в столбце. Для современных линейных ФПЗС $\Delta\omega_c T_c \approx 10^3$. Матричные среднеформатные ФПЗС обеспечивают $\Delta\omega_c T_c \approx 10^2$, но при одновременной обработке в нескольких сотнях каналов. Кроме того, возможно расширение предела по числу элементов при использовании гибридных сборок линейных и матричных ВЗН ФПЗС.

Важно подчеркнуть, что такой коррелятор является, по существу, оптическим процессором, осуществляющим вектор-матричное перемножение. Вектор анализируемого сигнала непрерывно перемножается в скользящем окне размером N на матрицу $M \times N$ записанных на опорной маске коэффициентов, где M — число столбцов. Скорость обработки на процессоре, получившем название конвейерного, соответствует $M \times N$ операций перемножения — сложения за период дискретизации — и составляет для современных ФПЗС $10^8 \dots 10^9$ опер./с ($M \approx 300$, $N \approx 300$, $T_c \approx 10^{-4}$ с).

В макете коррелятора на 500-элементном линейном ФПЗС [123] источником обрабатываемых сигналов служил генератор Г2-57, модулирующий ток накачки лазера ИЛПН-102 бинарными псевдослучайными последовательностями, причем можно было вводить регулируемую задержку. Опорная маска с тремя различными псевдослучайными последовательностями позволяла надежно определять по корреляционной функции совпадение генерируемого и опорного сигналов даже при наложении на опорный сигнал гауссовского шума с отношением сигнал-шум, равным 0,2. Коррелятор может быть выполнен в виде малогабаритного и надежного устройства, эквивалентного цифровому 8—12-разрядному процессору.

От оптического коррелятора несложно перейти к акустооптическому, анализирующему радиосигналы. В [122] рассмотрен акустооптический коррелятор с френелевской опорной маской, являющийся основным узлом радиодальномера. Импульсный полупроводниковый лазер, синхронизированный с зондирующими объектом радиопульсами, освещает акустооптический модулятор (АОМ). Под действием анализируемого радиосигнала в АОМ возбуждается бегущая ультразвуковая волна, которая для падающего на АОМ света представляет дифракционную решетку. Период

решетки, а следовательно, и положение дифрагированного светового пятна в фокальной плоскости следующей за АОМ линзы определяются частотой радиосигнала. При возбуждении АОМ широкополосным сигналом каждой его частотной составляющей соответствует световое пятно.

Распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы, расположенной после АОМ, передается на ФПЗС и регистрируется им. При этом по горизонтальной оси осуществляется отображение, а по вертикальной свет распределяется равномерно. Каждый вертикальный столбец ФПЗС соответствует одному дискрету дальности. Опорная маска расположена перед ФПЗС, на ней нанесены эталонные френелевские функции, своя для каждого дискрета дальности. ФПЗС работает в режиме непрерывного сканирования с частотой смещения строк, равной частоте зондирующих импульсов. Для определения положения объекта используется гетеродинное детектирование. Гетеродинный световой пучок равномерно освещает плоскость опорной маски и ФПЗС, в результате фазовый сдвиг выходного сигнала преобразуется в амплитудный сигнал, пропорциональный расстоянию до объекта. На выходе коррелятора формируется корреляционная функция, причем основной вклад вблизи максимума функции и ближайших боковых лепестков дает член вида $U = a_3/2 + [V\lambda RC(V\sqrt{2}\alpha)]/2V\sqrt{2}$, где a_3 — апертура элемента ФПЗС, λ — длина сигнальной волны, R — расстояние до объекта; C — интеграл Френеля; $\alpha = a_3/V\lambda R$.

Коррелятор, работающий без опорной маски, на сравнении двух входных сигналов $S_1(t)$ $S_2(t)$ имеет структурную схему, показанную на рис. 5.23. Луч лазера ОКГ освещает два акустооптических модулятора АОМ₁ и АОМ₂, ультразвуковые волны в которых распространяются во встречных направлениях. Дифрагированный свет проецируется с помощью линз L_1 и L_2 , разделенных диафрагмой D (фильтрующей нулевой порядок дифракции), на линейный ФПЗС. Выходной сигнал с каждого элемента ФПЗС пропорционален интегралу по времени накопления от интенсивности падающего на него света, которая, в свою очередь, пропорциональна квадрату модуля суммы амплитуд входных сигналов. Если входные сигналы имеют одинаковую частоту ω_s , то выражение для

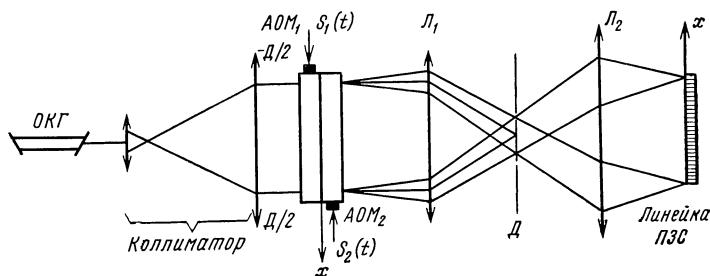


Рис. 5.23. Структурная схема акустооптического коррелятора с двумя модуляторами и линейным ФПЗС

выходного сигнала ФПЗС (подробнее см. [124]) содержит слабое, зависящее от координаты x вдоль АОМ, или, что то же самое, от номера элемента ФПЗС: $U(x) = R_{12}(x) \cos[2\omega_c x/S + \theta(x)]$, где $R_{12}(x)$ — кросскорреляционная функция обрабатываемых сигналов; S — скорость звука в звукопроводе АОМ, $\theta(x)$ — медленно меняющаяся функция, соответствующая фазе корреляционной функции. При равенстве длины фоточувствительной области ФПЗС и апертуры D акустооптического модулятора коррелятор вычисляет одновременно набор значений корреляционной функции для диапазона временных задержек между входными сигналами, равного $\Delta t = 2D/S$. Описанный акустооптический коррелятор эквивалентен многоканальному электронному коррелятору. Для определения фазы корреляционной функции на длине, равной периоду пространственной несущей $l = \pi S/\omega_c$, необходимо расположить минимум три фоточувствительных элемента ФПЗС [124]; тогда число разрешимых точек коррелятора $N_k = (\Delta\omega_c/\omega_c) \frac{N}{3}$, где N — число элементов ФПЗС. В современ-

ных АОМ относительная полоса пропускания достигает 0,6, т. е. при числе элементов ФПЗС, равном 1000 ... 2000, коррелятор позволяет получать 200 ... 400 разрешимых точек. В реализованном в [124] макете коррелятора использован АОМ со звукопроводом из стекла ТФ-3 и преобразователем из ниобата лития (частота 30 МГц) и линейный 500-элементный ФПЗС. Время накопления ФПЗС, следовательно, и длительность обрабатываемых сигналов составляет около 13 мс. Диапазон временных задержек входных сигналов около 6 мкс, полоса ЛЧМ сигнала 4 МГц, на автокорреляционной функции ширина корреляционного максимума по уровню 0,7 равнялась примерно 0,3 мкс. Видно, что акустооптический коррелятор на ФПЗС позволяет обрабатывать сигналы гораздо большей длительности, нежели акустооптический коррелятор без ФПЗС, у которого максимальная длительность обработки не превышает 3 мкс. Отметим, что время накопления, равное 13 мс, не предельное, оно может быть увеличено до 100 мс [124].

Другой класс акустооптических устройств с ФПЗС — спектроанализаторы — обеспечивают исключительно высокую разрешающую способность: до единиц и долей герц. Структурная схема спектроанализатора мало отличается от схемы коррелятора. Световой пучок от лазера через модулятор, управляемый сигналом $S_1(t)$, и коллиматор попадает на АОМ, на который подается сигнал $S_2(t)$. Дифрагировавший на ультразвуковой волне свет с помощью пары линз проектируется на ФПЗС. Диафрагма, расположенная между линзами, служит для фильтрации нулевого порядка дифракционной картины. Если сигналы $S_1(t)$ и $S_2(t)$ имеют одинаковые частоты, то распределение интенсивности света в плоскости ФПЗС будет соответствовать неподвижной волне в АОМ (т. е. интенсивность вдоль ФПЗС изменяется по синусоиде, но в каждой точке она во времени неизменна). При несовпадении частот интенсивность света в каждой точке (элементе) линейного ФПЗС

будет изменяться с частотой, равной разности частот входных сигналов. Если на входы устройства подать ЛЧМ сигналы, то выходной сигнал представит косинус-преобразование Фурье одного из сигналов. Чтобы пояснить это, предположим сначала, что на оба входа поступают два одинаковых ЛЧМ сигнала. Тогда интенсивность света в точке x , соответствующей началу АОМ, будет постоянна, так как частоты сигналов в этой точке одинаковы. По мере удаления от начальной точки будет увеличиваться разность между частотой света, падающего на АОМ, и частотой ультразвука в данной точке АОМ. Интенсивность света будет изменяться по закону

$$1 + \cos [\omega_c(x) t], \quad (5.5)$$

или, поскольку в ЛЧМ сигналах частота $\omega_c(x)$ линейно связана с координатой x , то

$$1 + \cos (\omega_0 + \Delta\omega_c x/T_c S) t, \quad (5.6)$$

где $\Delta\omega_c$, T_c — полоса и длительность ЛЧМ сигнала; S — скорость звука в звукопроводе АОМ. В (5.6) добавлена ω_0 — частота, пропорциональная величине задержки одного ЛЧМ сигнала относительно другого в общем случае, когда сигналы поступают на входы одновременно. Если амплитуда ЛЧМ на одном из входов определяется сигналом $S(t)$, сигнал на выходе ФПЗС будет иметь вид

$$U(x) \approx \int_0^T S(t) \cos [(\omega_0 + \Delta\omega_c x/T_c S) t] dt. \quad (5.7)$$

Выражение (5.7) и есть косинус-преобразование Фурье сигнала $S(t)$, причем разным частотным составляющим сигнала соответствуют видеосигналы с различных элементов ФПЗС, т. е. такое устройство является спектроанализатором параллельного типа [125].

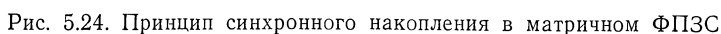
Спектр выходного сигнала лежит в полосе частот $(\Delta\omega_c/T_c) \times (D/S)$, где D — длина (апертура) АОМ. Разрешение по частоте не зависит от размеров АОМ и определяется временем накопления $\Delta\omega_{c \min} = 2\pi/T_n$. Время накопления ФПЗС намного больше времени памяти АОМ, равного отношению длины к скорости ультразвука, поэтому разрешение может намного превосходить разрешение спектроанализатора без ФПЗС (т. е. спектроанализатора на основе АОМ, в котором осуществляется интегрирование по пространству, а не по времени). В [124] на входы устройства подавались ЛЧМ сигналы с центральной частотой 20 МГц, полосой частот 4 МГц, длительностью 12 мс, сдвинутые относительно друг друга на 6 мкс. Один из ЛЧМ сигналов модулировался по амплитуде анализируемым сигналом. Начало генерации ЛЧМ сигналов было синхронизовано с началом накопления линейного ФПЗС, содержащего 500 элементов. Время накопления (около 60 мс) равнялось длительности ЛЧМ сигналов. Экспериментально найдено, что частотное разрешение спектроанализатора равнялось в среднем примерно 90 Гц, максимальное разрешение составило 18 Гц. При этом длительность обрабатываемого сигнала

в $2 \cdot 10^4$ раз превосходила длительность распространения ультразвука в звукопроводе АОМ.

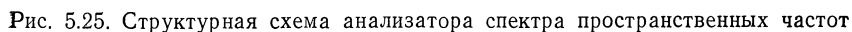
В [125] рассмотрено устройство с акустооптическим разделением частотных каналов многоэлементного радиоинтерферометра, в котором осуществлено управление частотно-контрастной характеристикой ФПЗС. Построенное на ФПЗС типа К1200ЦМ1 устройство обеспечивало формирование веерной диаграммы направленности радиоинтерферометра следующим образом. Фоточувствительная секция матрицы разбивалась на эквивалентные элементы по $L \times K$ ячеек, где L и K — число ячеек по вертикали и горизонтали. Изменение L и K осуществлялось ЭВМ путем объединения зарядовых пакетов в выходном регистре и в выходном устройстве ФПЗС. Варьируя размер по вертикали, изменяли полосу и центральную частоту настройки частотного канала приемного канала радиоинтерферометра. Изменяя оба размера, регулировали чувствительность канала. В [125] отмечено, что на частотную характеристику устройства влияет распределение фоточувствительности вдоль строки ФПЗС; определено, что длина нечувствительных зон, связанных со стоп-канальными областями, достигает 30% размеров фотоячейки.

Управление ЧКХ использовалось в устройстве проекционной муаровой топографии [126]. Муаровая топография — перспективный метод измерения бесконтактным образом формы и перемещений объектов. Для получения контурных линий исследуемого рельефа на объект проецируют изображение опорной бинарной решетки, которое затем в плоскости наблюдения анализируется с помощью ФПЗС, представляющим почти идеальную решетку. В [126] исследованы ограничения метода и, в частности, указано, что на низких пространственных частотах ФПЗС с фиксированной ЧКХ обеспечивает анализ муаровых полос только при определенном, достаточно большом угле между решеткой ФПЗС и опорной решеткой. Улучшить положение позволяет изменение частоты дискретизации с использованием схем выборки-хранения. Были осуществлены выборки в разных регистрах двухрегистрового четырехфазного ФПЗС и под разными фазовыми электродами. Это позволило обеспечить все необходимые сдвиги опорной решетки, кроме того, улучшился контраст муарового изображения. Выборки в [127] осуществлялись внешним образом с помощью ЭВМ, однако нет особых препятствий к размещению схем выборки-хранения на кристалле.

Перераспределение объемов обработки информации между ЭВМ и ФПЗС достигается применением *синхронного накопления* [127], принцип которого поясняется рис. 5.24. На матричный ФПЗС подается модулированный оптический сигнал. Для простоты принято, что полупериода модуляции $T_m/2$ амплитуда сигнала равна S_1 , вторые полупериода — S_2 . Сигнал проецируется на зону 2 ФПЗС, где накапливаются в течение отрезка времени от t_0 до $t_0 + T_m/2$ зарядовые пакеты, пропорциональные S_1 . По окончании полупериода зарядовые пакеты сдвигаются в экранированную от



В [122] описана экспериментальная система на матрице типа К1200ЦМ1, работавшей в режиме синхронного накопления с АОМ и ЭВМ типа «Электроника-100И». Примером, наглядно показывающим возможности оптической обработки информации с помощью ФПЗС, служит двумерный анализатор спектра пространственных частот, выполненный на матрице типа ФПЗС-2М [128]. Структурная схема анализатора приведена на рис. 5.25. Сиг-



нал с матрицы M , управляемой генератором G , пропускают через ключ K с коэффициентом передачи ± 1 ; управление знаком передачи ключа осуществляется опорными сигналами с синтезаторов по x и y после перемножения их в конъюнкторе Π . Счетчики $C1$ и $C2$ подсчитывают импульсы по координате x с коэффициентом пересчета 256 и по координате y с коэффициентом пересчета 144 и передают результат синтезаторам. В итоге осуществляется временное стробирование видеосигнала ФПЗС синхронно с двумя частотами: вывода элемента из выходного регистра и вывода строки из матрицы в регистр. Если промодулированный таким образом видеосигнал накапливать в течение времени кадра, напряжение на выходе интегратора I будет соответствовать амплитуде спектральной гармоники изображения при одном частотном значении двумерной сетки спектральных отсчетов. При работе в телевизионном стандарте время анализа одной спектральной гармоники составило около 10 мс, а получение полного двумерного спектра требует 1,5 мин.

В заключение рассмотрим двумерную оптическую фильтрацию изображения до ФПЗС. В [129] исследован ФПЗС типа К1200ЦМ7 (число элементов по горизонтали 360) с оптической маской, представляющей расположенные в шахматном порядке окна с площадью, равной половине площади элемента. Такая маска позволяет уплотнять пространственный спектр регистрируемого изображения и после обработки на ЭВМ увеличивать разрешающую способность по горизонтали предельно в 2 раза. На макете были достигнуты следующие результаты: без маски разрешение составляло около 300 ТВ-линий по вертикальному клину испытательной таблицы 0249, с маской разрешение повысилось до 500 ТВ-линий. Обработка изображения на ЭВМ заключалась в дискретном преобразовании Фурье, приравнивании нулю коэффициентов Фурье в высокочастотной части (фильтрация), обратное преобразование — восстанавливающая дискретизация изображения и интерполяция по 3×3 элементам. Недостатком использования маски является снижение в 2 раза светового потока, поступающего на ФПЗС.

5.5. Примеры применения ФПЗС в различных областях

Космос, астрономия. Матричные ФПЗС нашли применение в телескопах наземного и бортового базирования [74, 131, 132], в бортовой аппаратуре искусственных спутников Земли (ИСЗ) для наблюдения из космоса [132]. В [74] описано криостатируемое фотоприемное устройство на матрице типа ФПЗС-1М. На основании полученных значений пороговой облученности для времени накопления 1000 с и температуры, соответствующей минимуму на температурных зависимостях облученности, рассчитаны звездные величины объектов: 14^m для телескопа АЗТ-2 (70 см) и 17^m для телескопа БТА (6 м). Экспериментальные результаты, полученные в [130] на неохлажденной матрице типа К1200ЦМ1, выгля-

дят гораздо скромнее, достигнуто значение 9^m на телескопе МТМ-500 (0,5 м) с электронно-оптическим предусилением.

Особенностью телескопических систем являются большие размеры рабочего поля фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости телескопа. Желательно, например, иметь число фоточувствительных ячеек не менее 1000×1000 при размере ячейки 30×30 мкм (кружок рассеяния телескопа может составлять 50 ... 100 мкм). Изготовление такой матрицы без дефектов является достаточно сложным делом. В качестве альтернативы можно принять *метод сшивки изображений*, формируемых обычными крупноформатными матрицами типа К1200ЦМ7 и ФПЗС-4М. Перспективным представляется вариант фоконной сборки матриц, рассмотренный в [131]. Поглощение света в фоконе, достигающее 50%, компенсируется согласованием размеров кружка рассеяния телескопа и элемента матрицы (коэффициент масштабирования фокона выбран равным трем). Разрешающая способность при диаметре волокна фокона 5 мкм на узком торце остается практически неизменной.

В [132] описана телевизионная система (ТВС) пролетного космического аппарата, предназначенная для решения сложной задачи обнаружения в автоматическом режиме кометы и ее ядра, автосопровождения выбранного объекта и передачи на землю спектроскопических изображений с максимальной детальностью. Телевизионная система образует с автоматической стабилизированной платформой замкнутый контур самонаведения, т. е. ТВС не только должна передавать изображение кометы, но и обеспечивать выполнение функции наведения. По этой причине в состав ТВС входят два блока: телевизионная узкоугольная камера с длиннофокусным (1200 мм) объективом и телевизионный датчик наведения. Оба блока выполнены по двухканальной схеме на охлаждаемых матрицах типа ФПЗС1М. В узкоугольной камере применен электромеханический затвор, съемка ведется в восьми спектральных диапазонах (500 ... 1050 нм) с разрешающей способностью $3,1 \times 4,1$ угловых секунд на элемент, передача данных осуществляется *методом окна* по 100×100 элементов примерно за 3 с. Полет аппарата «Вега» подтвердил высокие технические данные и надежность ТВС.

Медицина. Система, включающая малокадровую камеру на матрице типа К1200ЦМ1 и блок обработки на матрице с вычитанием кадра типа К1200ЦМ8, применена для создания рентгенотелевизионной установки [133]. Максимальный поток рентгеновского излучения при медицинской диагностике составляет примерно $8 \cdot 10^4$ квант·мм⁻², что при использовании мягкого рентгеновского излучения существенно меньше дозы, вызывающей деградацию ФПЗС. Поэтому возможна регистрация непосредственно теневого рентгеновского изображения наряду с преобразованием его в оптическое с помощью ЭОП или детектора рентгеновского излучения. Видеосигнал с малокадровой ПЗС-камеры записывается в

верхнюю секцию матрицы К1200ЦМ8, затем сбрасывается в нижнюю секцию и снова записывается через средний регистр. В итоге осуществляется преобразование малокадрового сигнала в обычный вещательный, который подается на ВКУ.

В офтальмологии используется прибор кератометр, с помощью которого получают информацию о форме роговицы глаза: глаз фотографируют с одновременным наложением ортогональной сетки, затем на фотопленке измеряют координаты искривленной поверхностью роговицы сетки и вводят данные в ЭВМ для расчета формы контактной линзы. Замена фотоаппарата на линейный ФПЗС типа К1200ЦМ2 позволила вводить в ЭВМ информацию о реальном масштабе времени с высоким разрешением (снимают точки по диаметру, затем, поворачивая ФПЗС на определенный угол, получают сведения обо всей сфере глаза).

Интерес представляет применение ФПЗС для подчеркивания контуров томограмм и цифровой обработки рентгенограмм [134].

Аппаратура эксперимента. В [135] описан координатный детектор ионизирующего излучения на основе ФПЗС типа К1200ЦМ1 с мертвым временем 3,3 мс и разрешающим 400 нс при комнатной температуре. Охлаждение до 100К позволяет уменьшить время на до 640 мкс и 150 нс соответственно. Координатное разрешение детектора $\approx (2 \dots 10)$ мкм в зависимости от метода обработки сигнала и температуры. Для каждого трека выдаются две координаты в плоскости ФПЗС, разрешение между треками составляет примерно 100 мкм. Радиационная стойкость оценивается в 10^{12} частиц на детектор. Аналогичный детектор на матрице с числом элементов 32×108 детально изучен в [136], в частности, получен сигнал от релятивистского электрона, соответствующий 1600 носителям заряда, достигнуты отношение сигнала к шуму около 4,5 и эффективность регистрации частиц более 0,92. Перспективам использования ФПЗС в прецизионных вершинных детекторах для регистрации распадов короткоживущих частиц (менее 10^{-14} с) посвящена [137], в которой показано, что ФПЗС не имеет конкурентов в части координатного разрешения, позволяет измерять две координаты в одной плоскости и работает при нагрузке до 10^7 с $^{-1}$.

Линейные и матричные ФПЗС нашли применение в лазерной технике: в аппаратуре, регистрирующей распределение плотности энергии [138], в многоканальном анализаторе спектра флуоресценции, возбуждаемой импульсным лазером [139]. В автоматизированном измерителе относительного распределения энергии используется среднеформатная матрица, на которую пучок излучения лазера с длиной волны 0,4 ... 1,1 мкм попадает через узкополосный светофильтр и длиннофокусный объектив (800 мм). Предусмотрена юстировка измерителя с помощью вспомогательного лазера, светоделительной призмы и рассеивателя, обеспечивающего равномерное распределение энергии по матрице. Видеосигнал подается на АЦП, после чего записывается в ОЗУ емкостью 1 Мбайт,

или 64 кадра. Любой из кадров может быть выведен на ВКУ черно-белого или цветного изображения, а также на самописец. Измеритель рассчитан на регистрацию в одном цикле 64 импульсов излучения с максимальной частотой 100 Гц; погрешность измерения 5%. Аналогичный измеритель на линейном ФПЗС-1Л, разработанный в ЛФТИ, регистрирует распределение энергии в пучке импульсно-периодического неодимового лазера с длиной волны 1,06 мкм, длительностью импульса 5...20 нс и частотой повторения до 25 Гц. Вычислительная часть измерителя построена на базе ДВК-2 и крейта КАМАК. Измеритель позволяет, помимо самих измерений, вычитать фон, нормировать данные, сглаживать кривые методом наименьших квадратов, вычислять параметры гауссовских пучков, записывать распределение пучков до и после оптической системы.

На линейном ФПЗС типа К1200ЦЛ2 и микроЭВМ «Электроника-60» выполнен многоканальный анализатор спектра флуоресцентного лидара, предназначенного для зондирования загрязнений воды и почвы. Анализатор позволяет регистрировать весь спектр флуоресценции за время импульса лазера 10...15 нс. После выстрела лазерным импульсом сигнал отклика попадает на ФПЗС. Видеоимпульсы (2 МГц) через два шестиразрядных АЦП поступают в ОЗУ. После опроса ОЗУ в программном режиме информация вводится в память ЭВМ, выводится на графический дисплей, цифропечать, графопостроитель. Двухканальный блок АЦП позволяет снизить помехи и расширить динамический диапазон.

Телекиноаппаратура. При передаче по сети ТВ-вещания кинофильмов вертикальная развертка осуществляется в результате протяжки киноплёнки мимо линейного ФПЗС. Сигнал на выходе ФПЗС представляет последовательность строк, и для получения чересстрочной развертки в телекинопередатчик необходимо ввести ЗУ с памятью на кадр. Помимо этого проблемой становятся видеодефекты и неравномерность чувствительности ФПЗС. Видеодефект, проявляющийся в матричном ФПЗС в виде светлой точки, в данном случае даст светлую полосу на изображении, также подчеркивается при вертикальной развертке любая неоднородность чувствительности. Для компенсации локальных видеодефектов применяют способ запоминания дефектных элементов с последующей заменой их интерполяцией сигналов с соседних элементов. Неравномерность чувствительности может быть тоже скомпенсирована, но для этого приходится калибровать ФПЗС: записывать в ЗУ темновые и световые (при равномерной засветке) сигналы со всех ячеек ФПЗС и вычислять величины, обратно пропорциональные чувствительности каждой ячейки. Затем в рабочем режиме выходные сигналы с ФПЗС поступают на вычитающее устройство, где из них вычитают темновые составляющие, и на усилитель с переменным коэффициентом усиления, в котором осуществляется умножение на хранившиеся в ЗУ величины, обратно пропорциональные чувствительности. В телекинопередат-

чике для передачи цветных кинофильмов добавляются блоки светоделения и матрицирования цветовых составляющих. В [140] описан экспериментальный образец телекинопередатчика на трех линейных ФПЗС, структурная схема которого показана на рис. 5.26. Световой поток от кинопроектора 1 проходит сквозь киноплёнку, непрерывно протягиваемую лентопротяжным устройством 2, объектив 3, нейтральный диск с переменной оптической плотностью 4 и попадает на светоделительную призму 5. Светоделенные изображения проецируются на ФПЗС 6, 7, 8, сигналы с которых поступают на устройство 9 считывания, усиления и коррекции паразитных сигналов. В устройстве обработки 10 производится матрицирование, регулировка уровней черно-белого, гамма-коррекция и маскирование. В ЗУ 11 запоминаются кадры, затем при считывании изображения из ЗУ считываются за 1/50 с нечетные, за следующую 1/50 с — четные строки. На выходе 12 кодирующего устройства 12 формируется полный сигнал цветного телевидения. Генератор 14 вырабатывает импульсы управления ФПЗС и служебные импульсы. Устройство регулировки освещенности 16 через дополнительное устройство 15 вращает диск переменной оптической плотности 4, обеспечивая автоматическое изменение светового потока проектора в зависимости от плотности киноплёнки.

Ввод графической информации в ЭВМ. Простым вариантом ввода графической информации в ЭВМ является устройство для считывания индексов с конвертов, реализованное на быстродействующем линейном ФПЗС типа К1200ПЛ5. К такому же типу устройств для считывания малоразмерных (по высоте) объектов, не требующих вертикальной развертки, относится и опознаватель кода товарной продукции. При большой высоте изображения используют матричные ФПЗС, например, установка для исследования снятых на фотопленку интерферограмм [141] выполнена на матрице К1200ЦМ1. Установка работает в ручном и автоматическом режимах, осуществляя измерение координаты трех характерных точек интерференционной полосы — начала, середины и конца, а также многократное измерение координаты выбранной на

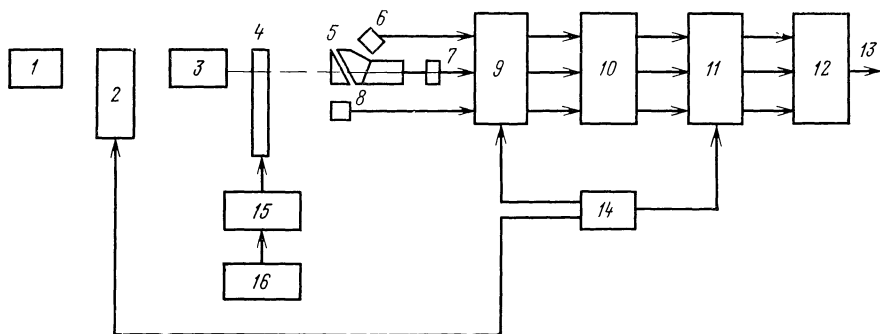


Рис. 5.26. Структурная схема телекинопередатчика для цветной пленки

полосе точки. Погрешность измерения составляет 0,05 ширины полосы, время измерения одного кадра (десять полос) по 200 строкам с фиксацией на цифропечати 5 мин. На ВКУ установки наблюдаются изображения интерференционных полос, измерительной метки в виде двух пересекающихся светлых линий и светящихся координатных x и y осей. При работе в ручном режиме оператор может устанавливать измерительную метку в любой точке экрана ВКУ, при этом координаты метки отображаются на цифровом индикаторе или печатаются на ленте. Устройство позволяет отказаться от длительного и достаточно субъективного процесса расшифровки интерферограмм с помощью измерительного микроскопа типа УИМ.

Весьма актуальной является задача ввода в ЭВМ графической информации с чертежей. В [142] описаны два возможных варианта решения. В одном из них используется планшет с возбуждаемыми координатными шинами. Считывающая головка состоит из линейного ФПЗС, на концах которого располагаются электромагнитные датчики, воспринимающие сигналы с координатных шин. Считывание сводится к перемещению головки по поверхности укрепленного на планшете чертежа: за одно перемещение считывается полоса шириною 14 ... 26 мм, последующие полосы выполняются с перекрытием. Второй вариант основан на применении прозрачного транспаранта с координатными осями, выполненными различным цветом. Светоделительная система выделяет вертикальные и горизонтальные линии координатной сетки; затем относительно их определяются координаты опорной точки и одной из точек пересечения ФПЗС с линией координатной сетки. Эти данные используются для определения методом интерполяции координат считываемых с чертежа линий. Транспарант помещают поверх чертежа и, перемещая вручную головку, считывают информацию в ЭВМ. В [142] указывается, что при этом проекция ФПЗС на транспарант должна пересекать не менее двух горизонтальных или вертикальных линий координатной сетки. Это вводит определенные ограничения на перемещение головки.

Задача автоматического чтения печатных и рукописных текстов решается оптическими читающими терминалами (ОЧТ). К ОЧТ предъявляются серьезные требования: универсальность, т. е. способность работать с машинописными шрифтами, типографским текстом, рукописными символами, написанными шариковой ручкой, пером, фломастером и др.; стандартизованное сопряжение с любой мини- или микроЭВМ; наличие внутренних стандартов на обмен информацией между блоками ОЧТ; невысокая стоимость. При выполнении этих требований ОЧТ становится незаменимым устройством в САПР, системах оформления документации, фототелеграфии, полиграфии, в системах машинного языкового перевода, считывания подписей, индексов и др.

В ранних разработках ОЧТ применялся ФПЗС типа К1200 ЦМ1 [143]; его лучшая, чем у ЭЛТ, равномерность чувствительности позволила упростить обработку видеoinформации. В эксперимен-

тальной считывающей системе ОКРУС-4, разработанной в ИНЭУМ, используется семь ФПЗС типа КБ1200 ЦМ4-3 (см. гл. 4), на основе которых создано многоканальное устройство ввода оптической информации.

Управление работой ОКРУС-4 и анализ текста производит микроЭВМ типа «Электроника-60». Анализ текста осуществляется путем сравнения ориентированных элементов изображения с набором эталонов, хранящихся в памяти блока классификации; коды классов передаются в ЭВМ. В модифицированном варианте ОКРУС-4 предусматривается возможность анализировать текст непосредственно на кристалле ФПЗС посредством ориентированного сдвига массива накопленных зарядов, позволяющая отказаться от сложной оптической системы. Испытания ОКРУС-4 показали, что система уверенно выделяет линии текста, отношение сигнал-шум составляло около двух для ортогональных направлений и не менее полутора для соседних ориентаций, отличающихся на 30° .

Заключение

Хотелось бы надеяться, что книга дает достаточно полное представление о ФПЗС — принципе их действия, типах и параметрах, областях применения. Разработчиками аппаратуры ФПЗС используются как рядовые (может быть, не совсем еще рядовые) комплектующие изделия в промышленных ТВ-камерах, системах технического зрения, на борту спутников и самолетов, в медицине и технике связи. В СССР выпускаются крупно- и среднеформатные матричные и линейные ФПЗС, специальные типы ФПЗС. Разработаны БИС для управления ФПЗС, обеспечивающие миниатюризацию аппаратуры. Описанные в книге отечественные ФПЗС условно делят на два поколения [50]: к первому относятся трехфазные ФПЗС с поверхностным каналом, ко второму — трехфазные и двухфазные ФПЗС с объемным каналом. Второе поколение обладает рядом достоинств по сравнению с первым поколением — объемный канал обеспечивает лучшие частотные свойства и эффективность переноса, двухфазная система облегчает эксплуатацию (например, к трехфазному линейному ФПЗС К1200ЦЛ1 требуется подвести пять импульсных последовательностей, а к аналогичному двухфазному К1200ЦЛ5 — только две). Не следует, однако, считать, что ФПЗС с объемным каналом должны полностью вытеснить ФПЗС с поверхностным каналом. Напротив, оба класса могут гармонично дополнять друг друга. Напомним, что на ФПЗС с поверхностным каналом типа К1200ЦМ1 были получены параметры, превосходящие мировой уровень: плотность темнового тока не более $10 \text{ пА} \cdot \text{см}^{-2}$, предельная частота до 15 МГц.

Каковы перспективы дальнейшего развития ФПЗС в нашей стране? Анализ разработок ФПЗС в СССР и других странах позволяет сформулировать следующие положения. В области фунда-

ментальных физических исследований актуальна задача создания адекватной трехмерной модели ФПЗС, описывающей процессы, протекающие в ФПЗС, и связывающей их со свойствами полупроводникового материала и конструкторско-технологическими параметрами. В настоящее время создана одномерная модель ПЗС (аналитические соотношения, положенные в основу модели, содержатся в [2, 41]). Очень интересна задача создания ФПЗС с внутренним усилением, т. е. твердотельного варианта фотоэлектронного умножителя (ФЭУ). Ждут своего решения такие серьезные физические проблемы, как радикальное повышение радиационной стойкости и расширение спектрального диапазона чувствительности.

Технологические проблемы сегодняшнего дня и ближайшего будущего намного шире физических, затрагивают ряд смежных областей, таких, например, как технология полупроводниковых материалов, прецизионное машиностроение, оптика, измерительная техника.

Технология ФПЗС может рассматриваться в качестве высшей стадии развития технологии МОП СБИС. Рекордно большие размеры кристаллов и оптический ввод информации—два специфических для технологии ФПЗС фактора, серьезно усложняющих ее освоение. При таких размерах кристаллов резко повышаются требования к качеству полупроводниковых материалов, фотолитографии, чистоте производственных помещений. С оптическим вводом информации связаны три основных проблемы, стоящие в настоящее время перед разработчиками и технологиями ФПЗС: повышение чувствительности и разрешающей способности; подавление растекания носителей при локальных пересветках и смаза изображения; расширение спектрального диапазона.

Повышение чувствительности достигается уменьшением толщины электродов или максимальным увеличением области накопления, не закрытой электродами. Обязательным условием повышения чувствительности и разрешающей способности является борьба с темновыми токами, как технологическими приемами, среди которых наиболее важным становится геттерирование, так и интеграцией ФПЗС с микрохолодильниками. В стремлении увеличить разрешающую способность с помощью большего числа элементов на кристалле разработчики сталкиваются с проблемой роста площади кристалла и падения выхода годных. По этой причине у матриц, предназначенных для нестудийных ТВ-камер и имеющих числа элементов не более 580×700 , кристалл ограничивают размерами 10×10 мм. Даже появившиеся недавно для ТВ-камер повышенной четности лабораторные разработки матриц с числом элементов более $1 \cdot 10^6$ не выходят за эти пределы. В то же время весьма заманчиво уменьшить площадь кристалла, поскольку кроме увеличения выхода годных, пропорционально снизятся габаритные размеры объектива и камеры, а масса при уменьшении площади кристалла в 2 раза уменьшится в 3...5 раз. Чем определяется возможность уменьшения размеров кристалла?

Физические соображения в современных ФПЗС в виде ограничивающих факторов пока не выступают. Действительно, задавшись реальными значениями зарядовой емкости объемного канала 10^{12} см⁻², количеством шумовых электронов 50, отношением сигнал-шум 6 и динамическим диапазоном 10^3 , получим, что минимальные размеры фотоячейки составляют примерно $5,4 \times 5,4$ мкм. Ширина канала переноса лежит в тех же пределах. Это означает, что кристалл матричного ФПЗС может быть примерно уменьшен до 6×6 мм. Основной проблемой при этом станет обеспечение фотолитографических норм на уровне 1 мкм, чтобы стоп-канальные и антиблуминговые области занимали как можно меньше полезной площади. Радикальным решением является отказ от горизонтального антиблуминга и переход на вертикальный. Неограниченный рост разрешающей способности обеспечивают гибридные ФПЗС, требующие, впрочем, высоких точностей при сборке и термостабилизации всей конструкции. При создании ФПЗС с объемным каналом основным технологическим процессом становится прецизионное ионное легирование в режимах сверхмалых доз (0,1 мкКл) и высоких энергий (0,5 ... 0,7 МэВ). Для подавления растекания носителей при локальных пересветках и смаза изображения все шире используют вертикальные стоки, создаваемые на основе эпитаксиальных структур $p-n^+$ -типа или карманов p -типа в подложке n -типа. Расширение спектрального диапазона в коротковолновую (синюю) область базируется на замене МОП-накопителей фотодиодами, применении просветляющих покрытий и преобразующих фотопроводящих слоев (халькогенидные стекла, $a\text{-Si:H}$, $a\text{-SiC:H}$ и др.). Продвижение в ИК-область идет по двум направлениям: разработка ФПЗС на кремнии, легируемом примесями с глубокими уровнями, и применение узкозонных полупроводниковых материалов (кадмий — ртуть — теллур, антимонид индия). Технология ФПЗС на узкозонных материалах намного отстает от технологии кремниевых ФПЗС и требует серьезных усилий по доработке ее до производственного уровня.

Анализ зарубежной информации и собственный опыт позволяют выделить следующие особенности технологии современных ФПЗС:

- использование кремния, вытянутого по методу Чохральского в осевом магнитном поле. Кремний отличается высокой воспроизводимостью параметров;

- переход на пластины кремния большого диаметра (это особенно выгодно для ФПЗС, имеющих большие размеры кристаллов) с лазерным контролем нарушенного слоя;

- использование только проекционной фотолитографии (сканирующей и пошаговой), пошаговый метод менее производителен, но обеспечивает лучшую точность и потому применяется даже для изготовления линейных ФПЗС с большой длиной кристалла («сшивки» на пластине);

применение совместно негативных и позитивных фоторезистов с идентичными характеристиками и эксплуатационными свойствами, это позволяет снижать плотность критических дефектов; постоянное снижение температуры окисления, диффузии, отжига после ионного легирования, желательного до 700°C и ниже; развитие методов геттерирования, в том числе внутреннего геттерирования как мощного орудия снижения темновых токов ФПЗС.

Перспективы развития технологии ФПЗС таковы:

переход в ближайшие годы к субмикронной технологии (уже сейчас созданы лабораторные образцы ФПЗС с размерами менее 1 мкм) с целью повышения степени интеграции и рабочей частоты;

увеличение роли прецизионного ионного легирования с энергиями до 1 ... 2 МэВ в сочетании с низкотемпературными (500°C) отжигами для сохранения профиля распределения примеси; в дальнейшем можно ожидать разработки холодной технологии с минимальным числом вносимых термообработкой дефектов;

развитие технологии ИК ФПЗС на узкозонных полупроводниковых материалах до производственного уровня.

Разработка новых типов ФПЗС всецело зависит от технологических возможностей. На очереди — серийный выпуск крупноформатных матричных ФПЗС второго поколения с кадровым и строчно-кадровым переносом, предназначенных для миниатюрных ТВ-камер цветного и черно-белого изображения. Подчеркнем, что выпуск крупноформатных матриц не означает отказ от среднеформатных. Во всем мире выпускаются ФПЗС широкой номенклатуры и среднеформатные матрицы с числом элементов около 256×256 находят все большее применение в автоматике, устройствах ввода информации в ЭВМ, системах визуального контроля. Тенденции, складывающиеся в разработке ФПЗС, можно сформулировать следующим образом:

а) увеличение доли разработок ХУ-матриц, имеющих по сравнению с традиционными ФПЗС с кадровой и строчно-кадровой организацией ряд преимуществ. Такие матрицы облегчают произвольную выборку и разнообразную обработку на кристалле (преобразования Фурье, Уолша, Адамара), позволяют снижать распыление и смаз изображения, обещают в принципе более высокий выход годных;

расширение разработок ФПЗС с виртуальной фазой, технология которых наиболее устойчива к влиянию случайных дефектов разного рода;

совмещение на кристалле ФПЗС с устройствами обработки видеосигнала, в частности со схемами двойной коррелированной выборки.

В области применения ФПЗС на первый план выдвигается перспектива создания *адаптируемых систем технического зрения*, способных распознавать зрительные образы, т. е. переходить от регистрации изображения к его опознаванию. Требования к бу-

дущим устройствам оптоэлектроники включают интеграцию функций преобразования и передачи информации, функций аналоговой и цифровой обработки, нежесткую программу работы, адаптивность. Аппаратура на ФПЗС идеально отвечает этим требованиям, дополняя функционально традиционную микроэлектронную технику.

В Японии за последние годы произошел примечательный видеовзрыв: бытовые ТВ-камеры цветного изображения на ФПЗС выпускаются десятками тысяч. Другие страны, в частности США, пока присматриваются к новому виду техники и не спешат с массовым производством ТВ-камер на ФПЗС. Ясно одно, выпуск бытовой видеоаппаратуры требует высочайшего уровня заводской технологии, только при этом условии себестоимость матричного ФПЗС окажется приемлемой, а массовое производство ФПЗС — оправданным (впрочем, его объемы вряд ли когда-либо превысят десятки... сотни тысяч матриц в год).

Фоточувствительные приборы с зарядовой связью — новый и весьма перспективный класс МОП БИС. Уникальные достоинства ФПЗС раскрыты далеко не полностью, и в этой области найдется немало интересного и значимого для исследователей, технологов, разработчиков, схемотехников — создателей аппаратуры и систем на основе ФПЗС.

Список литературы

1. Пресс Ф. П. Формирователи видеосигнала на приборах с зарядовой связью. — М.: Радио и связь, 1981. — 136 с.
2. Носов Ю. Р., Шилин В. А. Физика приборов с зарядовой связью. — М.: Наука, 1986. — 320 с.
3. Технология СБИС: Пер. с англ./Под ред. С. Зи. — М.: Мир, 1986. — Кн. 1. — 405 с.
4. Boyle W. S., Smith G. E. Charge semiconductor devices//Bell System Techn. J. — 1970. — Vol. 49, N 1. — P. 587—593.
5. Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза и Д. Моргана; Пер. с англ. под ред. Ф. П. Пресса. — М.: Энергоиздат, 1981. — 372 с.
6. Пригожин Г. Я. Матричные формирователи видеосигнала на ПЗС для одноматричных цветных телевизионных камер//Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1986 — Вып. 4. — 60 с.
7. Секен К., Томпсет М. Приборы с переносом заряда. Пер. с англ./Под ред. В. В. Поспелова, Р. А. Суриса. — М.: Мир, 1978. — 327 с.
8. Скрылев А. С. Приборы с зарядовой связью для обработки аналоговых сигналов//Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1983. — Вып. 9. — 55 с.
9. Nobukazu Teranishi, Nobuhiko Muto. Partition Noise in CCD Signal Detection//IEEE Trans. on Electron Devices. — 1986. — Vol. ED-33, N 11. — P. 1696—1700.
10. Пресс Ф. П. Фоточувствительные микросхемы с зарядовой связью//Итоги науки и техники. Сер. Электроника/ВИНИТИ. — 1985. — Т. 18. — С. 33—88.
11. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения/Под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уайта; Пер. с англ. — Под ред. Р. А. Суриса. — М.: Мир, 1979. — 573 с.
12. Вето А. В., Скрылев А. С., Старовойтов В. И. Секционный формирователь сигналов с временной задержкой и накоплением//Электронная промышленность — 1982. — № 7. — С. 19—21.
13. Tower J. R. Design and Performance of 4x5120-Element Visible and 2X2560 — Element Shortwave Infrared Multispectral Focal Planes//RCA Review. — 1986. — Vol. 47. — P. 226—254.
14. Yoto H. CCD Linear Image Sensor with Buried Overflow Drain Structure//Electron Lett. — 1981. — Vol. 17, N 24. — P. 904—905.
15. Ishihara J. Interligne CCD Image Sensor with on Antiblooming Structure//IEEE Trans on Electron. Devices — 1984. — Vol ED-31, N 12 — P. 1829—1833.
16. Приборы с зарядовой связью: Пер. с англ./Под ред. Д. Ф. Барба. — М.: Мир, 1982. — С. 198—235.
17. Корж В. И., Кусков В. Е., Стенин В. Я. Детекторы рентгеновского излучения на приборах с зарядовой связью//Приборы и техника эксперимента — 1982 — № 3. — С. 7—15.
18. Автоматизированная система измерения параметров фоточувствительных матриц ПЗС/В. Ю. Березин, Ю. А., Друян, А. Г., Коссов и др.//Электронная промышленность. — 1984, № 3 — С. 30—32.
19. Lee T. H. A Color CCD Image Sensor of Imaging Photographic Negatives//Extend. Abstr of the 16th (1984 International) Conference on Sol. State Devices and Materials. — Kobe, 1984. — P. 329—332.
20. Saks N. S. Interface State Trapping and Dark Current Generation in Buried-Channel CCD//J. Appl. Phys. — 1982. — N 3. — P. 1745—1753.
21. Lubberts G. Optical Properties of Phosphorous-doped Polycrystalline Silicon Layers//J. Appl. Phys. — 1981. — N 52(11). — P. 6870—79.
22. Пригожин Г. Я. Мощность, рассеиваемая в затворной системе приборов с зарядовой связью//Электронная техника. — Сер. Полупроводниковые приборы. — 1987. — Вып. 1 (186). — С. 7—12.
23. Nobukazu Teranishi An Interline CCD Image Sensor with Reduced Image Lag//IEEE Trans. — on Electron. Dev. — 1984. — Vol ED-31, N 12 — P. 1829—1833.

24. Eiji Oda Blooming Suppression Mechanism for an Interline CCD Image Sensor with a Vertical Overflow Drain//IEDM 83 — 1983. — P. 501—504.
25. Брянцева Н. Л., Канунников А. И., Пригожин Г. Я. Зависимость зарядовой емкости ПЗС с объемным каналом от технологических режимов// Электронная промышленность. — 1989. — № 3. — С. 49.
26. Пригожин Г. Я. Выбор уровней тактового напряжения в приборах с зарядовой связью с объемным каналом//Электронная техника. — Сер. Полупроводниковые приборы. — 1987. — Вып. 3(188). — С. 24—29.
27. Березин В. Ю. Анализ и методика расчета выходного устройства ПЗС/Под ред. А. А. Васенкова и Я. А. Федотова//Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Сов. радио, 1980. — Вып. 5. — С. 229—236.
28. Нарышкин С. Н., Пресс Ф. П., Пригожин Г. Я. Инженерный расчет выходных устройств ПЗС//Электронная промышленность. — 1989. № 3 — С. 49.
29. Караханян Э. Р. Динамические элементы ЭВМ со структурой МДП//М.: Сов. радио, 1979. — С. 36—38.
30. Арутюнов В. А., Котов Б. А., Сорокин О. В. Повторители выходного напряжения для ПЗС и ФПЗС//Электронная техника Сер. Электровакuumные и газоразрядные приборы, 1984. — Вып. 3 (102). — С. 32—37.
31. Hawkins G. A. Characterization of Generation Current in Solid—State Imagers//IEEE Trans. on Electron Devices. — 1985. — Vol. ED-32, N 9 — P. 1806—1816
32. Hyncsek J. Virtual-Phase Technology: A New Approach to Fabrication of Large—Area CCD's//IEEE Trans. on Electron Devices — 1981 — Vol. ED-28 — P. 483—489
33. Hyncsek J. A CCD with Virtual Phases. UR Patent Application, Great Britain, N 2 021313, 1979, 26 apr.
34. Фоточувствительные схемы с зарядовой связью: состояние и перспективы развития/А. В. Вето, Е. В. Костюков, Ю. А. Кузнецов и др.//Электронная промышленность — 1982 — Вып. 7 (113). — С. 2—5.
35. Производство кремниевых подложек для больших интегральных схем/Ю. Д. Чистяков, А. И. Пекарев, А. Н. Бурмистров//Зарубежная электронная техника. — 1986. — № 4. — С. 3—61.
36. Ikuta K., Ohara T. Lifetime Evaluation of Denuded Zone Quality and Intrinsic Gettering Effect on Heavy Metals//Jap. J. of Appl. Phys — 1984. — Vol. 23, N 8. — P. 984—990.
37. Swaroop R. B. Advances in Silicon Technology for the Semiconductor Industry//Solid State Technology. — 1983. — N 7. — P. 97—101
38. Boginski T. A., Monkowcki J. R. Correlation of Precipitation Defects and Gold Profiles in Intrinsically Gettered Silicon//J. Electrochem. Soc. — 1986 — Vol. 133, N 4. — P. 762—769.
39. Jastrzebski Z. A Comparison of Internal Gettering during Bipolar, CMOS and CCD (High, Medium, Low Temperature) Processes//J. Electrochem. Soc. — 1987 — Vol. 134, N 4. — P. 1018—1025.
40. Лабунов В. А. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники//Зарубежная электронная техника. — 1983. — № 11. — С. 3—66.
41. Brown D. K., Nu S. M., Morrissey J. M. Flaws in Sidewall Oxides Grown on Polysilicon Gate//J. Electrochem. Soc. — 1982. — Vol. 129, N 5. — P. 1084—1089.
42. Bergeron S. F., Duncan B. F. Controlled Anisotropic Etching of Polysilicon//Solid State Technology. — 1982 — Vol. 25, N 8 — P. 98—103.
43. Cerefolini G., Polignano M. A Comparison of Gettering Techniques for Very Large Scale Integration//J. Appl. Phys. — 1984. — N 55(2). — P. 579—585.
44. Пригожин Г. Я., Смирнова В. М. Паразитная инжекция носителей в матрицах приборов с зарядовой связью//Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы — 1985. — Вып. 3 (176). — С. 37—39.
45. Stapper C. H., Armstrong F. M., Saji K. Integrated Circuit Yield Statistics//Proc. IEEE — 1983. — Vol. 71, N 4. — P. 453—470.

46. Stapper C. H. Modeling of Defects in Integrated Circuit Photolithographic Patterns//IBM J. Res. Develop. — 1984. — Vol. 28, N 4. — P. 461—474.
47. Ferris — Prabhu A. V. Modeling the Critical Area in Yield Forecasts//IEEE J. of Solid — State Circuits. — 1985. — Vol. SC-20, N 4 — P. 874—878
48. Jastrzebski L., Lagowski J. Deep Levels Study in Float Zone Si Used for Fabrication of CCD Imagers//J. Electrochem. Soc. — 1981, Vol. 128, N 9 — P. 1957—1963.
49. Кашлаков Н. Д., Кленов В. Т., Костюков Е. В. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью K1200ЦЛ1//Электронная промышленность — 1982. — Вып. 7 — С. 7—9
50. Перфилов А. В., Фролов В. А., Хатунцев А. И. Специфические особенности измерения шумов ПЗС//Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы — 1986. — Вып. 1 (180). — С. 56—60.
51. Журавлева Л. И., Кагановский И. П. Опережающее шумоподавление при записи фотографических фонограмм//Техника кино и телевидения. — 1986. — № 6. — С. 20—22.
52. Антошкин В. А., Петров Г. Г., Саввин А. В. Исследование характеристик линейки ПЗС типа А-1033//Новая техника в астрономии Сер. Приборы и методы исследований — 1984 — С. 65—68.
53. Кузнецов Ю. А., Шилин В. А. Микросхемотехника БИС на приборах с зарядовой связью — М. Радио и связь, 1988 — 160 с.
54. Василевская Л. М., Костюков Е. В., Павлова Э. В. Линейная фоточувствительная схема с зарядовой связью типа K1200ЦЛ2//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7 — С. 10—13.
55. Хатунцев А. И. МДП-транзисторы в стробируемых интеграторах//Электронная техника. — Сер. Полупроводниковые приборы. — 1986 — Вып. 2 (181) — С. 74—78.
56. Характеристики ПЗС-линеек в области пороговой чувствительности/Х Кислинг, А. Л., Меньшиков, В. Н. Поляков, В. И. Приходько — Препринт — Дубна, 1985. — 8с — (ОИЯИ, Р10—85—550).
57. Василевская Л. М. Характеристики спектрального прибора с переносом заряда K1200ЦЛ4, предназначенного для многозональных телевизионных систем//Электронная техника. — Сер. Полупроводниковые приборы — 1988. — Вып. 3 (194) — С. 18—22
58. Костюков Е. В., Павлова З. В., Пресс Ф. П. Линейные фоточувствительные микросхемы с зарядовой связью K1200ЦЛ5 и K1200ЦЛ6//Электронная промышленность. — 1987. — Вып. 3 (161). — С. 19—22
59. Арутюнов В. А. Линейный ФПЗС для автоматизации пространственных измерений//Электронная промышленность. — 1986. — Вып. 5 (153). — С. 16—18.
60. Гаврилов Г. А., Сотникова Г. Ю. Разрешающая способность преобразователей оптического изображения на основе ПЗС//Оптическая обработка изображений/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л.: Наука, 1985 — С. 90—103.
61. Арутюнов В. А., Котов Б. А., Сорокин О. В. Фотоэлектрический линейный преобразователь «Квант-2»//Электронная промышленность. — 1981. — Вып. 9. — С. 23.
62. Использование ПЗС в системах оптической обработки информации/В. А. Арутюнов, Н. А. Есепкина, Б. А. Котов и др.//Приборы и техника эксперимента. — 1982. — № 1. — С. 98—102.
63. Костюков Е. В., Огородников А. Г., Турилина Л. С. Линейный высокоапертурный фоточувствительный прибор с зарядовой связью//Электронная промышленность. — 1990 — № 2. — С. 49.
64. Иванов С. А. Оценка контрастной чувствительности фотоприемника с переносом зарядов//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1982. — Вып. 6. — С. 30—35.
65. Довжиков Д. А., Куликов А. И., Филиппов В. Н. Оптимизация режима работы матричного ПЗС при низких уровнях освещенности//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1983. — Вып. 5. — С. 38—44.

66. Телекамера на матрице ПЗС с расширенным динамическим диапазоном/ В. А. Зеленов, А. Н. Куликов, А. Н. Марков и др.//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1986. — Вып. 4. — С. 31—36.
67. Иванов С. А. Оценка потенциальной чувствительности малокадровой телевизионной камеры на фотоприемнике с переносом зарядов//Техника средств связи. — Сер. Техника телевидения. — 1983. Вып. 4. — С. 15—22.
68. Марков А. Н., Пригожин Г. Я., Смирнова В. М. Матричная фоточувствительная схема с зарядовой связью типа К1200ЦМ2//Электронная промышленность — 1982 — Вып. 7 — С. 13—17.
69. Марков А. Н. Фоточувствительный прибор с зарядовой связью типа К1200 ЦМ7//Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы — 1990. — Вып. 4. — С. 68—87.
70. Матричный ФПЗС с переносом кадра с повышенной чувствительностью/ Г. Я. Пригожин, С. Г. Лымарь, Ю. А. Кузнецов и др.//Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 8. — С. 47—48.
71. Матричный ФПЗС со строчно-кадровой организацией/С. Б. Бахвалов, Е. В. Костюков, Л. А. Сильева и др.//Электронная промышленность.— 1988 — Вып. 9. — С. 55—56.
72. Фоточувствительные матрицы ПЗС с числом элементов 576×512 и 288×256 /В. Ю. Березин, Ю. С. Зинчик, Б. А. Котов и др.//Электронная промышленность — 1982. — Вып. 7. — С. 27—33
73. Аксененко М. Д., Баранчиков М. Л. Приемники оптического излучения. — М. Радио и связь, 1987. — 295 с.
74. Чувствительность и рабочая температура термостатируемого ФПУ на основе матричного фоточувствительного ПЗС/Л. Г. Вальская, В. И. Гуляев, В. Ю. Березин и др.//Кинематика и физика небесных тел. — 1986. — Т. 2, № 3. — С. 75—80.
75. Ваняшина Е. В., Васильева Л. А., Вето А. В. Малоформатные матричные ПЗС-формирователи видеосигналов серии КБ1201 ЦП//Электронная промышленность. — 1981. — Вып. 9 (105). — С. 3—4.
76. Высокочувствительные гибридные матричные ПЗС-формирователи видеосигналов/А. В. Вето, Ю. П. Докучаев, А. С. Скрылев и др.//Электронная промышленность — 1981. — Вып. 9 (105)—С. 4.
77. Вето А. В., Скрылев А. С. Расширение функциональных возможностей ФСЗС с кадровым накоплением//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7 — С. 17—19.
78. Довжиков Д. А. Нестационарные помехи в телевизионных камерах на ПЗС//Техника средств связи Сер. Техника телевидения — 1987. — Вып. 4 — С. 23—28.
79. Охлаждаемое фотоприемное устройство для телевизионной аппаратуры «Вега»/В. Ю. Березин, И. А. Галядкин, В. И. Гуляев и др.//Электронная промышленность. — 1985. — Вып. 9 (147). — С. 4.
80. Быстродействующий интегральный формирователь фазовых сигналов К1138АП1 для управления микросхемами с зарядовой связью/А. И. Гольдшер, В. Е. Кусков, А. И. Лашков, В. Я. Стенин//Электронная промышленность. — 1989. — Вып. 2 — С. 49—51.
81. Быстродействующие интегральные преобразователи уровней К1119ПУ1, К1119ПУ2 для управления микросхемами с зарядовой связью/А. И. Дик, А. И. Гольдшер, А. И. Лашков, В. Н. Стенин//Электронная промышленность. — 1989. — Вып. 2. — С. 48—49.
82. Интегральный четырехуровневый преобразователь К1119ПУ3 для управления микросхемами с зарядовой связью/А. И. Гольдшер, П. А. Дик, А. И. Дашков, В. Я. Стенин.//Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 2. — С. 52, 52.
83. Волков И. Н., Володин В. А. Микросхема К1124АП2 для твердотельных портативных телекамер на основе ФПЗС//Электронная промышленность. — 1990. — Вып. 4 — С. 82—84.
84. Стенин В. Я. Применение микросхем с зарядовой связью. — М: Радио и связь, 1989. — 256 с.

85. Котов Б. А., Черевань О. А. Возможность использования синусоидальных сигналов для управления приборами с зарядовой связью//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1985. — Вып. 2. — С. 33—38.
86. Лазовский Л. Ю., Тимофеев В. О., Хвиливицкий А. Т. Схемы управления ПЗС и усиления выходного сигнала//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7 — С. 69—74.
87. Таджибаев Ш. З. Телевизионные устройства на твердотельных фотопреобразователях. — Ташкент: Фан, 1986. — 130 с.
88. Остапчук В. Г., Кагановский И. П., Великович В. В. Применение систем технического зрения для автоматизации размерного контроля деталей//Станки и инструмент. — 1985 — № 4. — С. 5—7.
89. Володин В. А., Лобанов В. Д., Уваров Н. Е. Экспериментальная ТВ-камера на основе ПЗС//Техника кино и телевидения. — 1982. — № 3. — С. 54—56.
90. Балягин А. В. Серийные ТВ-камеры с твердотельным датчиком изображения К1200 ЦМ2//Техника кино и телевидения. — 1984. — № 9 — С. 46—47.
91. Балягин А. В., Верешагин С. И., Долганин Ю. Н. Исследование характеристик ТВ-камер на серийных ПЗС типа К1200 ЦМ1 и К1200 ЦМ2//Электронная техника. Сер. Полупроводниковые приборы. — 1985. — Вып. 1 (174). — С. 80—82.
92. Кодочигов С. А., Пантелеев В. Н., Приходько А. Ю. Телевизионная камера на ПЗС//Средства связи. — 1983. — № 4. — С. 30—32.
93. Новгородов Н. Н., Кучерук В. П., Зарубкин В. В. Малогабаритная телевизионная камера с повышенной чувствительностью//Автоматика, телемеханика и связь. — 1987. — № 8. — С. 16, 17.
94. Дик П. А., Краснюк А. А., Стенин В. Я. Телевизионная камера на фоточувствительной микросхеме с зарядовой связью с кадровым переносом//Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 4. — С. 85—87.
95. Комплект микросхем для миниатюрной твердотельной камеры промышленного телевидения/В. А. Володин, И. Д. Дебелов, О. Г. Реботенко, В. Я. Шлеив//Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 3 (171). — С. 39—41.
96. Цветоделительное устройство для передающей ТВ-камеры с одной фокусирующей линзой/Н. И. Белов, Ю. П. Докучаев, А. Л. Захаров и др//Электронная промышленность. — 1984. — Вып. 3(13). — С. 13—16.
97. Многоканальный фоточувствительный матричный ПЗС/В. Ю. Березин, Г. И. Вишневский, Н. М. Глазова и др//Электронная промышленность. — 1988. — Вып. 3 (171). — С. 33—35.
98. Твердотельное телевидение. Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах/Л. И. Хромов, Н. В. Лебедев, А. К. Цицулин, А. Н. Куликов; Под ред. И. А. Росселевича. — М.: Радио и связь, 1986 — 184 с.
99. Малокадровая телевизионная камера на ПЗС, реализующая межкадровое вычитание/Г. С. Бордуков, Д. А. Довжиков, А. Н. Куликов и др//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1979. — Вып. 4. — С. 22—29.
100. Телекамера на матрице ПЗС с межкадровым вычитанием/А. В. Вето, Д. А. Довжиков, А. Н. Куликов и др//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1982 — Вып. 1. — С. 3—11.
101. Арутюнов В. А., Великатный С. А., Степанов Р. М. Линейный ФПЗС в контрольно-измерительных системах технического зрения устройств автоматизации/Электронная промышленность. — 1986. — Вып. 5(153). — С. 10—15.
102. Остапчук В. Г., Кагановский И. П. Средства оцувствления промышленных роботов — М.: ВНИИТЭМР, 1987. — 50 с.
103. Антошин В. Д., Кагановский И. И., Козлова Т. Н. Автомат контроля диаметров поликристаллов кремния на ПЗС//Электронная промышленность — 1982. — Вып. 7. — С. 95.
104. Кагановский И. П., Остапчук В. Г. Оптический измеритель геометрических размеров деталей, использующий фотоэлектрические преобразователи на ПЗС//Измерительная техника. — 1985. — № 4 — С. 33.
105. Базыленко В. А., Миронченко В. И., Пирогов Ю. А. Оптико-электронный прибор для бесконтактного измерения размеров и смещений непрозрачных объектов//Приборы и техника эксперимента. — 1983. — № 5. — С. 245.

106. Скрибанов Е. В., Гришин М. П., Братенков А. А. Устройство для измерений линейных перемещений//Измерительная техника. — 1983. — № 11. — С. 13—15.
107. Бессарабов Н. В. Измерители размеров и перемещений на основе приборов с переносом заряда//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7. — С. 82—85.
108. Мерзляков В. С., Разинов В. А., Сонькин М. А. Измеритель ширины горячей полосы на основе ПЗС для стана 300 Макеевского металлургического комбината//Создание и исследование систем автоматизации и контроля для повышения производительности и качества проката и труб. Сб. статей/Под ред. Н. Н. Дружинина. — М.: ВНИИМЕТМАШ. — 1985. — С. 72—79.
109. Многоканальная система регистрации спектра на базе линейного ПЗС-формирователя изображения/В. А. Арутюнов, С. Ф. Горбачев, А. П. Демин и др.//Оптико-механическая промышленность. — 1986. — № 1. — С. 34—35.
110. Владимирская В. К., Ефимова В. Ф. Применение устройства технического зрения в автоматизированном комплексе фрезерной ячейки//Электронная промышленность — 1986. — Вып. 10 (158). — С. 37—38.
111. Система измерений линейных перемещений для станков с ЧПУ/Ю. А. Друян, Я. М. Оступк, С. М. Рузин и др.//Электронная промышленность. — 1986. — Вып. 6 (154). — С. 44.
112. Контроль оптических элементов входных узлов электронно-лучевых и фотоэлектрических приборов/Е. Б. Берестенко, В. И. Гуляев, В. А. Кошелев и др.//Электронная промышленность. — 1985. — Вып. 7 (145). — С. 67.
113. АЦП осциллографической информации на ПЗС-матрице/Г. П. Вихров, П.-В. Григонис, И. И. Жилевич, Н. Е. Исаенко//Приборы и системы управления. — 1983. — № 6. — С. 19—20.
114. Плеханов В. М., Славинский З. М. Применение ПЗС для автоматизации сборки интегральных микросхем//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7. — С. 85, 86.
115. Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайск. политехн. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производственных процессов, 1987. — 210 с.
116. Бланк А. М., Славинский З. М., Фирсова Т. В. Анализ изображений в системах с техническим зрением на основе ПЗС//Электронная промышленность. — 1982. — Вып. 7. — С. 88—91.
117. Микропроцессорная система распознавания образов/В. А. Паладьев, В. А. Кормилин, Ю. В. Мартышевский и др.//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайский политехн. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производств. процессов, 1987. — С. 4, 5.
118. Алиев Т. М. Быстродействующая система распознавания образов фигур произвольной формы на основе матричных ПЗС//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайский политехн. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производств. процессов, 1987. — С. 57.
119. Кузьмин И. В., Стащенко А. А. Автоматизированная система неразрушающего контроля внешнего вида печатных плат//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайский политехн. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производств. процессов, 1987. — С. 63—64.
120. Хомяков Ю. Н. Метод цифровой реконструкции томограмм в частотной области//Науч. тр.: Изв. ЛЭТИ/Ленингр. электротехн. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина). — Л., 1984. — Вып. 339. — С. 38.
121. Богословский А. В., Мирошниченко С. И., Яковлев В. Н. Некаузальный фильтр на ПЗС/Радиотехника. — 1984. — № 6. — С. 35—37.
122. Оптические корреляторы с опорными масками и сканирующими ПЗС-фотоприемниками/В. А. Арутюнов, Н. Н. Евтихийев, Н. А. Есепкина и др. — Препринт. — М., 1987. — 20 с. — (МИФИ, № 010 — 87).
123. Бахрах Л. Д., Есепкина Н. А., Лавров А. П. Оптические процессы со сканирующими ПЗС-фотоприемниками//Современное состояние и перспективы применения оптических методов передачи, хранения и обработки информации: Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л.: ЛФТИ, 1984. — С. 213—223.

124. Акустооптические устройства обработки сигналов с использованием ПЗС/ Н. А. Бухарин, Н. А. Есепкина, А. П. Лавров и др.//Оптико-электронные методы обработки изображений: Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л.: Наука, 1982. — С. 103—117.
125. Молодяков С. А., Новицкий А. П., Саенко И. И. Программное управление характеристиками акустооптического приемника на ПЗС//Современное состояние и перспективы применения оптических методов передачи, хранения и обработки информации. Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л. ЛФТИ, 1984. — С. 239—244.
126. Куликовский С. Ю., Рыхлов А. Ф. Информационные ограничения, накладываемые на параметры проектируемой решетки в методах муаровой топографии при использовании ПЗС-фотоприемников//Оптико-электронные методы обработки изображений. Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л.: Наука, 1982. — С. 148—153.
127. Есепкина Н. А., Молодяков С. А., Саенко И. И. Организация синхронного накопления на матричном ПЗС фотоприемнике в модуляционном спектрометре//Письма в ЖТФ. — 1986. — Т. 12. — Вып. 2. — С. 118—122.
128. Гордин А. И., Менсов С. Н. Применение матрицы ПЗС для оперативной спектральной обработки изображений//Современное состояние и перспективы применения оптических методов передачи, хранения и обработки информации. Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова. — Л.: ЛФТИ, 1984. — С. 224—231.
129. Моделирование преобразований изображений в телевизионных камерах на ПЗС с оптической маской/Н. Г. Гуторова, Н. Г. Михелевич, А. И. Палочкин, Н. Н. Шостацкий//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1987. — Вып. 2. — С. 18—24.
130. Опыт применения матричного приемника света для наблюдения звезд/А. Н. Абраменко, А. В. Бадягин, С. И. Верещагин и др.//Новая техника в астрономии. — Л.: Наука, 1984. — С. 77—79.
131. Телевизионная камера высокой четкости на матрице ПЗС с фоконом/В. Л. Бабинцев, Н. В. Лебедев, К. В. Скурлов, А. Н. Марков//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1987. — Вып. 4. — С. 18—22.
132. Телевизионная система пролежного аппарата «Венера — Галлей»/Ш. Салаи, Л. Сабо, И. Рени и др.//Научное космическое приборостроение. — М.: Металлургия, 1983. — Вып. 2. — С. 47—60.
133. Смелков В. М., Иванов С. А. Камеры с предельной чувствительностью на ПЗС//Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. — 1985. — Вып. 2. — С. 26—32.
134. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г. Восстановление продольных томограмм//Оптические и оптико-электронные методы обработки изображений и сигналов. Сб. статей/Под ред. С. Б. Гуревича и В. К. Соколова. — Л.: ЛФТИ, 1982. — С. 123—129.
135. Головкин С. В., Рыкалин В. И. Координатный детектор с разрешением 2—10 мкм на основе ПЗС. — Препринт. — Серпухов. 1980. — 23 с. — (ИФВЭ, № 80 — 100ЭФ).
136. Характеристики детектора частиц на основе ПЗС/В. Н. Говорун, С. В. Головкин, В. И. Рыкалин и др. — Препринт. — Серпухов. 1983. — 24 с. (ИФВЭ, № 83 — 1360ЭФ).
137. Головкин С. В., Рыкалин В. И. Перспективы использования ПЗС в прецизионных вершинных детекторах для регистрации распадов короткоживущих частиц. — Препринт. — Серпухов, 1984. — 12 с., — (ИФВЭ, № 84—82)
138. Захожий В. В. Автоматизированный измеритель относительного распределения плотности энергии//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайский политех. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производств. процессов. — 1987. — С. 65—66.
139. Марин Н. И., Хмельницкий Г. С. Многоканальный анализатор спектра во флуоресцентном лидаре на базе датчика ПЗС//Тез. докл. IV Всесоюз. совещ./Алтайский политех. ин-т. — Барнаул: НИИ автоматизации производств. процессов, 1987. — С. 18—19.

140. **Лунева З. П., Новаковский С. В.** Проблемы создания телекиноаппаратуры на однострочных ПЗС//Техника кино и телевидения. — 1980. — № 2. — С. 29 — 32.
141. **Телевизионная установка для исследования интерферограмм/С. К. Штандель, Ю. А. Близнюк, П. Я. Смолин, А. В. Балягин//Оптико-механическая промышленность.** — 1983. — № 4. — С. 29—31.
142. **Применение** интегральных матричных фотопреобразователей на ПЗС в системе ввода в ЭВМ письменной документации/Е. Н. Филинов, В. А. Кузнецов, Ф. П. Пресс и др.//Тез. докл. на Всесоюз. конф. «Применение ИС, микропроцессоров, микроЭВМ и микроэлектронной технологии в приборостроении». — Орел, 1979. — С. 68—69.
143. **Акимов В. М., Златопольский В. А.** Экспериментальное исследование многоканального фотоприемного тракта в системе ОКРУС-4//Интеллектуальные читающие терминалы: Сб. статей. — М.: Институт электронных управляющих машин, 1986. — С. 63—73.

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Основы работы приборов с зарядовой связью	6
1.1. МОП-емкость — элемент прибора с зарядовой связью	6
1.2. Зарядовая связь	22
1.3. Сдвиговый регистр с зарядовой связью	26
Глава 2. Типы и характеристики фоточувствительных приборов с зарядовой связью	42
2.1. Оптический ввод информации	42
2.2. Типы фоточувствительных приборов с зарядовой связью	51
2.3. Характеристики и параметры	73
Глава 3. Проектирование и изготовление фоточувствительных приборов с зарядовой связью	87
3.1. Вопросы проектирования	87
3.2. Инженерный расчет основных узлов	90
3.3. Технология	114
Глава 4. Параметры фоточувствительных приборов с зарядовой связью и интегральных микросхем управления	146
4.1. Параметры линейных ФПЗС	146
4.2. Параметры матричных ФПЗС	159
4.3. Интегральные микросхемы управления	177
Глава 5. Применение фоточувствительных приборов с зарядовой связью	189
5.1. Устройства управления ФПЗС и обработки видеосигнала	189
5.2. Телевизионные камеры на ФПЗС	203
5.3. Системы технического зрения	219
5.4. Устройства оптико-электронной обработки информации	232
5.5. Примеры применения ФПЗС в различных областях	242
Заключение	248
Список литературы	252
	261

Производственное издание

Пресс Феликс Павлович

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Заведующий редакцией **Ю. Н. Рысев**
Редактор **Е. Н. Гарденина**
Переплет художника **А. Я. Толмачева**
Художественный редактор **Н. С. Шейн**
Технический редактор **А. Н. Золотарева**
Корректор **Т. Л. Кускова**

ИБ № 1762

Сдано в набор 21.12.90
Формат 60×90¹/₁₆
Печать высокая
Уч изд. л. 20,22
Зак 108

Бумага тип. № 2
Усл. печ. л 16,5
Тираж 5000 экз.

Подписано в печать 05.04.91
Гарнитура литературная
Усл. кр.-отг. 16,5
Изд. № 22484
Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь», 101000 Москва, ул. Кирова, д. 40

НОВЫЙ УРОВЕНЬ ИССЛЕДОВАНИЙ С ЛАЗЕРАМИ «ИНОТЕХ»

ОБЪЕДИНЕНИЕ «ИНОТЕХ-ПРОГРЕСС»
ведущий производитель твердотельных лазеров
среди малых предприятий страны

ПРЕДЛАГАЕТ

Импульсные твердотельные лазеры

с преобразованием частоты излучения в гармоники

Длины волн излучения от 216 до 1064 нм

Энергия излучения в импульсе — от единиц до сотен миллиджоулей

Лазеры ИНОТЕХ-Микро, -Мини являются высокоэффективными компактными приборами, работают от сети 220 В, не требуют водяного охлаждения

Перестраиваемые лазеры

Диапазон перестройки от 220 до 750 нм

Энергия в импульсе до 100 мДж

Акустооптическая перестройка длины волны излучения

Автоматизированные спектральные комплексы

ЛАФС, ҚАРС, ЛИФ, ҚР и акустооптические спектрометры

Отдельные узлы и блоки для спектральных комплексов

Лазеры и спектральные комплексы разрабатываются и изготавливаются под конкретные условия заказчиков

Широкий набор сопутствующих принадлежностей

Измерители характеристик излучения

Дистанционные ИК-термометры

Оптические элементы и узлы лазеров

Источники питания для лазеров

Оптические столы фирмы «ЭКСМА» позволит Вам полностью оснастить лабораторию

Обращайтесь к нам

Адрес: 117292 Москва, ул. Ив. Бабушкина, 11/2, факс 129 58 72

Телефоны: 124 32 88 — генеральный директор Серегин С. Л.

331 64 11 — коммерческий директор Парфенов Б. А.

331 67 33 — начальник отдела лазерной техники

Рысь С. В.

Всесоюзное объединение «Электронинторг» УМЛА-600-013

УСТАНОВКА ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ С ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ОТ МИНИ-ЭВМ

Установка лазерной маркировки с числовым программным управлением от ЭВМ предназначена для нанесения с высокой скоростью буквенно-цифровых, кодовых и произвольных изображений практически на любые твердые материалы и может быть использована в труднодоступных местах.

На установке может производиться маркировка широкого ассортимента изделий электронной техники — кремниевых пластин, микросхем, транзисторов, соединителей кристаллов, а также изделий машиностроения — подшипников, деталей автомобилей и самолетов, инструментов и т. д.

Нанесение надписей осуществляется без механических деформаций маркируемых объектов. Установка позволяет полностью автоматизировать процесс маркировки.

В качестве источника лазерного излучения использован одномодовый лазер ГОИ-16-1 с длиной волны излучения 1,06 мкм, работающий в режиме модуляции добротности.

Сканирование луча лазера осуществляется по двум ортогональным координатам с помощью двух электромеханических дефлекторов.

В установке применена мини-ЭВМ «Электроника МС0125», которая управляет режимом излучения лазера и работой дефлекторов.

В установке предусмотрено использование двух сменных объектов, которые обеспечивают поля маркировки 50×50 или 110×110 мм.

Технические характеристики:

Максимальная скорость маркировки буквенно-цифровых знаков, знак/с	20
Размер шрифта, мм	0,5 .. 100
Размер поля маркировки, мм	50×50 ; 110×110
Питание установки трехфазное:	
напряжение, В	380
частота, Гц	50
мощность, кВт	10
Габаритные размеры, мм	
блока излучателя	$1132 \times 1500 \times 1350$
блока питания	$600 \times 800 \times 900$

Экспортер — Всесоюзное объединение «Электронинторг», СССР, 125315 Москва, ул. Усневича, 24/2, Телекс 411326

