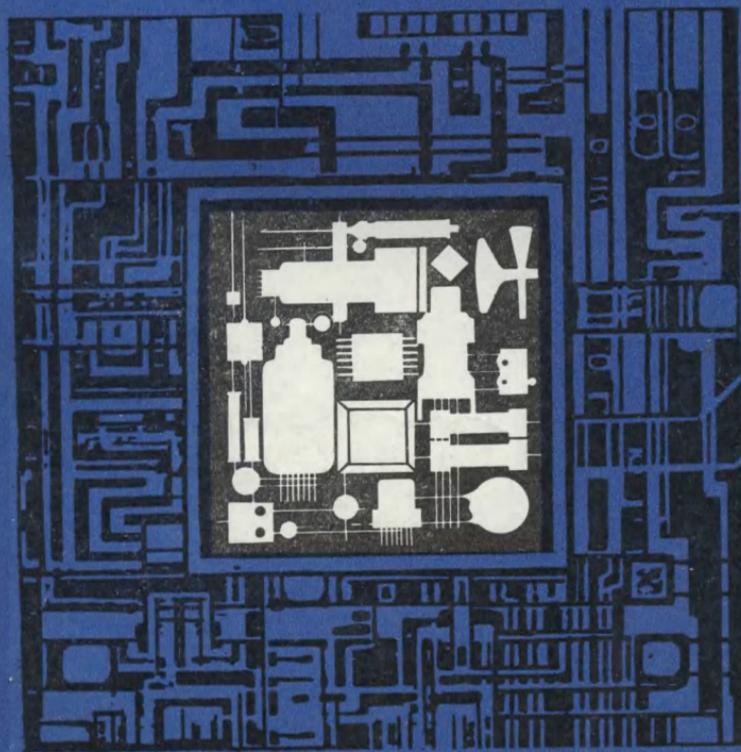


МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

ЭЛЕКТРОНИКА

В.Н.МОРОЗОВ

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ
МАТРИЧНЫЕ
ПРОЦЕССОРЫ**



МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

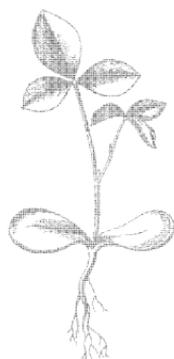
«ЭЛЕКТРОНИКА»

В.Н.МОРОЗОВ

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ
МАТРИЧНЫЕ
ПРОЦЕССОРЫ**



МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1986



Scan AAW

БК 32.86
М 80
УДК 681.325.5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

*В. М. Вальков, Б. Ф. Высоцкий, Г. Г. Горбунова, В. И. Иванов,
И. В. Лебедев, Э. А. Лукин, Ю. Р. Носов, В. Н. Сретинский (зам.
отв. редактора), В. И. Стафеев, Ю. Б. Степанов, В. А. Шахнов*

Морозов В. Н.

М 80 Оптоэлектронные матричные процессоры. — М.:
Радио и связь, 1986.—112 с., ил. — (Массовая б-ка
инженера «Электроника»).

35 к. 10 000 экз.

Изложены основные требования к оптоэлектронным логическим элементам и приведены способы построения элементов с минимальными размерами и энергопотреблением. Описано выполнение основных логических и арифметических операций методом управляющих операторов и представлены примеры эффективного решения задач этим методом. Приведена структура матричного оптоэлектронного процессора и дана оценка его производительности. Обсуждаются особенности цифровой обработки информации в оптическом диапазоне.

Для инженерно-технических работников, специализирующихся в области оптической обработки информации и вычислительной технике.

М 240300000-016
146(01)-86 126-86

БК 32.86

Рецензент В. И. Ревенко

Редакция литературы по конструированию
и технологии производства радиоэлектронной аппаратуры

МОРОЗОВ ВАЛЕНТИН НИКОЛАЕВИЧ

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ МАТРИЧНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ

Заведующий редакцией П. И. Никонов Редактор Н. В. Ефимова
Художественный редактор Н. С. Шеня Технический редактор А. Н. Золотарева
Корректор Т. В. Дземидович

ИБ № 1130

Сдано в набор 07.06.85 Подписано в печать 14.11.85 Т-20266
Формат 84×108^{1/32} Бумага ин.-журнальная № 1 Гарнитура литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 5,88 Усл. кр.-отт. 6,195 Уч.-изд. л. 6,42
Тираж 10 000 экз. Изд. № 21113 Зак. № 367 Цена 35 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва. Почтамт, а/я 693

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО
«Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. 113054, Москва, Валовая, 28

© Издательство «Радио и связь», 1986.

Предисловие

Структура вычислительных машин существенным образом связана с техническими средствами, используемыми при построении машины. На чем могут быть основаны будущие высокопроизводительные системы с параллельными вычислениями? Использование света как носителя информации позволит избежать многих трудностей, характерных для электроники. Свет электрически нейтрален, поэтому нет проблем наводок и взаимных помех. Малая длина волны позволяет считать, что свет обладает «двумерной» природой: с помощью света можно производить операции над «картинами» параллельно, т. е. одновременно над большим количеством элементов изображения.

В настоящее время разработаны высокоэффективные лазеры, развиты методы модуляции и управления лазерным излучением. Бурно развиваются волоконно-оптические линии связи, запоминающие устройства на видеодисках, интегрально-оптические логические элементы. Оптические интегральные схемы, содержащие инжекционные лазеры и соединенные световодами с модуляторами и другими элементами управления излучением, представляют собой пример нового направления, научный фундамент которого, без сомнения, еще только выявляется.

В Физическом институте АН СССР имени П. Н. Лебедева (ФИАН) много внимания уделяется развитию работ, направленных на существенное повышение эффективности вычислительных машин на основе оптоэлектронной техники. Эти работы носят комплексный характер: разрабатываются многоканальные оптические линии связи, голографические запоминающие устройства на основе инжекционных лазеров, оптические запоминающие устройства большой емкости с быстрой записью и стиранием информации, быстродействующие цифровые управляемые транспаранты, полупроводниковые лазеры с электронным возбуждением, допускающие быстрое сканирование излучающего пятна и создание на их основе, например, адресных трубок для выборки инфор-

мации и получение высококачественного цветного телевизионного изображения на большом экране.

На пути создания высокопроизводительных оптоэлектронных процессоров встречается много трудностей, и хотя до последнего времени не было предложено оптоэлектронных устройств, свободных от значительных недостатков, было достигнуто много важных частных решений этой проблемы. Поскольку элементная база будущих высокопроизводительных процессоров в достаточной мере развита и продолжает стремительно совершенствоваться, то, по-видимому, настало время обсудить структуру будущих оптоэлектронных процессоров, дать предполагаемую оценку их производительности, уточнить требования к различным оптоэлектронным элементам.

Работы по методам построения оптоэлектронных процессоров проводятся во многих академических и отраслевых институтах.

В 1974 г. в ФИАНе были разработаны методы построения оптоэлектронных процессоров в непозиционной системе счисления — в системе остаточных классов. Тогда же стало ясно, что помимо высокой производительности оптоэлектронный процессор должен обладать большой гибкостью, т. е. различные задачи на оптоэлектронном процессоре должны решаться с одинаково высокой эффективностью. Начиная с 1976 г., в институте разрабатываются принципы построения оптоэлектронных процессоров на основе метода управляющих операторов. Суть этого метода заключается в том, что теперь в оптоэлектронном процессоре нет специализированных блоков для выполнения логических и арифметических операций. Обработка информации происходит в оптическом тракте, состоящем из цифровых оптически управляемых транспарантов. Алгоритмы вычислений хранятся в виде двумерных картин в оптической памяти и вид выполняемой операции определяется только типом оператора. Это — перспективная идея, и на этом пути могут быть реализованы принципы картинной логики.

Эта идея может также внести вклад и в решение проблем сегодняшнего дня. На основе метода управляющих операторов могут быть созданы, например, коммутаторы каналов для оптической линии связи, различные переключательные устройства для вычислительной техники, устройств управления, самообучающиеся автоматы и т. д.

У нас в стране уделяется большое внимание разработке методов использования когерентного света для хранения, обработки и передачи информации. Советские ученые внесли весомый вклад в исследование проблемы оптоэлектронных вычислений. Здесь необходимо упомянуть о большом цикле теоретических и экспериментальных работ, выполненных сотрудниками лаборатории оптоэлектроники ФИАНа Ю. М. Поповым, В. Н. Морозовым, И. Н. Компанцом, Э. А. Мнацаканяном. Значителен вклад в развитие проблемы М. А. Карцева, С. К. Ли, К. К. Свидзинского, Л. А. Орлова. Эти исследования и легли в основу настоящей книги.

Академик Н. Г. Басов

Глава I

Элементная база оптоэлектронных процессоров

1. Основные логические операции вычислительной техники

Цифровые вычислительные машины содержат следующие основные устройства: арифметические, запоминающие, устройства управления, ввода данных и вывода результатов вычислений. Структурная схема цифровой вычислительной машины показана на рис. 1. Рассмотрим назначение и роль устройств, представляющих собой функционально независимые части вычислительной машины.

Арифметическое устройство машины предназначено для выполнения арифметических, логических или других операций над числами, на которые распадается любой вычислительный процесс. Основой арифметического устройства является сумматор, осуществляющий сложение двух чисел. Выполнение всех других операций сводится к сложению (однократному или многократному) и некоторым другим вспомогательным действиям, например сдвигам, нужным при выполнении умножения. Характеристикой арифметического устройства служит его быстродействие, т. е. время, затрачиваемое на каждую операцию, или количество операций в единицу времени, а также состав возможных операций, выполняемых арифметическим устройством.

Память машины служит для хранения всей требуе-

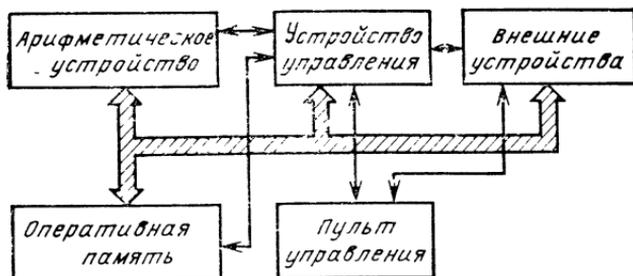


Рис. 1. Структурная схема электронной цифровой вычислительной машины

мой информации: исходных данных, промежуточных и окончательных результатов вычислений. Кроме того, в памяти хранятся алгоритмы решения задач. Память машины воспринимает информацию, передаваемую из других устройств, например из арифметического, или поступающую в машину через вводные устройства, и выдает во все другие устройства информацию, требуемую для протекания вычислительного процесса. Характеристиками памяти машины являются ее объем (емкость) и быстродействие (скорость или время обращения).

Быстродействие памяти определяется временем обращения, т. е. временем, необходимым для записи в память или считывания из памяти. Естественным требованием к памяти является возможно больший ее объем. Легко понять, что эти требования противоречивы: чем больше емкость памяти, тем больше времени тратится на выполнение операции записи или считывания. Противоречие разрешается разделением запоминающего устройства на оперативную (или внутреннюю) и внешнюю память.

Оперативная память машины делится на отдельные ячейки, состоящие из определенного, постоянного для данной машины числа разрядов. Каждый из разрядов может принимать одно из двух возможных значений: 0 или 1. Таким образом, содержимое ячейки памяти воспринимается как двоичное число, называемое машинным словом. Объем памяти характеризуется количеством машинных слов, которые могут быть в ней записаны. Оперативная память непосредственно общается с остальными устройствами машины, в том числе с управлением и арифметическим устройством.

Ввод служит для преобразования исходных данных в удобную для машины форму и введения всей требуемой информации в память машины. Информация из ввода поступает непосредственно лишь в оперативную память.

Вывод предназначается для преобразования результатов вычислений в форму, приемлемую для человеческого восприятия и дальнейшего использования.

Устройство управления обеспечивает определенное взаимодействие всех устройств вычислительной машины между собой, автоматически управляя вычислительным процессом.

В качестве примера в табл. 1 приведем некоторые характеристики современных сверхбыстродействующих вы-

Таблица 1

Параметр	Cray Research	Control Data	Texas Instruments
Система	Cray-1	STAR-100	ASC
Длина машинного слова, бит	64	64	64
Максимальная скорость выполнения операции, млн., 64 разрядов, слов с:			
сложение	80	50	37
умножение	80	25	21
деление	25	12,5	16
Емкость основной памяти, млн. слов	0,25—1	0,5—1	0,125—1
Время цикла, нс	50	1280	160

числительных систем. Процесс решения задачи состоит в осуществлении некоторого алгоритма — определенной предписанной последовательности операций. При этом под операцией следует понимать не только арифметические или алгебраические операции, но также и действия типа: сравнение чисел, переход к новой операции, условные действия, которые следует или не следует производить в зависимости от выполнения или невыполнения некоторых условий и т. п.

Для того чтобы поручить осуществление алгоритма цифровой вычислительной машине, его необходимо представить в виде последовательности элементарных операций машины. Запись алгоритма решения данной задачи в виде последовательности элементарных операций данной машины называют программой.

Современные цифровые вычислительные машины работают в двоичной системе счисления. Для изображения чисел в этой системе требуются лишь две цифры и поэтому для их записи используют элементы, имеющие два устойчивых состояния: одно из них принимают за изображение 0, а другое — за изображение 1. Запоминающие элементы должны хранить одну двоичную цифру, а арифметическое устройство — осуществлять арифметические операции в двоичной системе. Вообще каждое машинное слово представляет собой набор двоичных цифр, т. е. 0 и 1.

Результат любой операции, выполняемой в машине, есть двоичное число, поэтому логические элементы машины можно рассматривать как функциональные преоб-

разователи, на входах и выходах которых — двоичные числа. Удобно считать аргументами и значениями функции отдельные разряды двоичных чисел. В этом случае логический элемент приобретает вид устройства с несколькими входами и выходами, причем на каждый вход подается и с каждого выхода снимается двоичная цифра — 0 или 1. Таким образом, речь идет о переменных и функциях, принимающих лишь значения 0 или 1. Такие переменные и функции носят название логических или булевских — по имени английского математика и логика Джорджа Буля (1815—1864), явившегося создателем современной символической логики.

Аргументы логических функций могут принимать только два различных значения. Поэтому для функции любого числа переменных существует конечное число различных наборов аргументов, и логическую функцию можно задать с помощью таблицы, в которой будут перечислены все возможные наборы аргументов и соответствующие значения функции. Например, функция трех переменных $z=f(a, b, c)$ может быть задана таблицей, содержащей восемь строк (табл. 2); функция n переменных имеет 2^n различных наборов аргументов. Для большого числа аргументов табличное представление громоздко и плохо обозримо. Удобнее сложные логические функции выражать через простые и хорошо изученные функции небольшого числа переменных при помощи формул.

Рассмотрим основные логические функции двух аргументов.

Логическая функция И. Значения функции И от двух

Таблица 2

Пример определения функции трех переменных с помощью таблицы

Аргументы			Функция
a	b	c	
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Таблица 3

Таблица значений логической функции И

Аргументы		Функция И
a	b	
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

аргументов определяются табл. 3. Из таблицы видно, что значения функции И совпадают с произведением аргументов, поэтому ее называют также логическим умножением. Еще одно название для этой операции, употребляемое в математической логике, — конъюнкция. Нетрудно определить функцию И для любого конечного числа аргументов: она равна 1 тогда и только тогда, когда все сомножители равны 1.

Логическое умножение обозначается знаком \wedge . Эта операция подчиняется переместительному и сочетательному законам: $a \wedge b = b \wedge a$ (коммутативность); $(a \wedge b) \wedge c = a \wedge (b \wedge c)$ (ассоциативность).

Логическая функция ИЛИ. Эта функция для двух аргументов задается таблицей (табл. 4). Ее называют логическим сложением или дизъюнкцией и обозначают знаком \vee . Нужно отметить, что логическое сложение чисел отличается от их арифметической суммы. Эта операция также подчиняется переместительному и сочетательному законам: $a \vee b = b \vee a$; $(a \vee b) \vee c = a \vee (b \vee c)$. Кроме того, для операций логического сложения и умножения справедлив распределительный (дистрибутивный) закон: $a \wedge (b \vee c) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$. Логическая сумма нескольких слагаемых равна 0 тогда и только тогда, когда все слагаемые равны 0.

Логическая функция отрицания НЕ. Функция НЕ зависит от одного аргумента (табл. 5). Она обозначается чертой, поставленной над аргументом, т. е. \bar{a} . Подобно арифметическим операциям логические операции имеют различное «старшинство», что отражается на порядке их выполнения в выражениях, содержащих символы различных операций: прежде всего выполняется операция НЕ, затем И и только потом ИЛИ. Здесь наблюдается полная аналогия с алгебраическими выражениями. При

Таблица 4

Таблица значений логической функции ИЛИ

Аргументы		Функция ИЛИ
a	b	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 5

Таблица значений логической функции НЕ

Аргумент	Функция НЕ
0	1
1	0

вычислении по формуле $a^2b^2+c^2$ сначала выполняются возведения в степень, затем умножение a^2b^2 и только потом сложение. Аналогично, в формуле $\bar{a}\wedge\bar{b}\vee\bar{c}$ сначала выполняются отрицания, затем конъюнкция, а потом дизъюнкция. В тех случаях, когда нужно изменить этот порядок, применяют круглые скобки, правила использования которых в логических выражениях не отличаются от тех же правил для алгебраических формул.

С помощью логических функций легко заменить громоздкие таблицы простыми формулами. Так, функцию $z=f(a, b, c)$ трех аргументов, заданную табл. 2, можно выразить простой формулой: $z=\bar{a}\wedge\bar{c}\vee a\wedge b$.

Аналогичное представление возможно и для других логических функций. Пусть, например, логическая функция Φ трех аргументов $\Phi=\Phi(a, b, c)$ задается наборами значений аргументов, для которых она обращается в 1:

$$a=1; \quad b=0; \quad c=1;$$

$$a=1; \quad b=1; \quad c=0;$$

$$a=0; \quad b=0; \quad c=1.$$

Поставим в соответствие каждому набору логическое произведение аргументов, в которых сомножитель, равный 0, берется со знаком отрицания. Получим три функции:

$$F_1(a, b, c) = a\wedge\bar{b}\wedge c;$$

$$F_2(a, b, c) = a\wedge b\wedge c;$$

$$F_3(a, b, c) = \bar{a}\wedge b\wedge c.$$

Образовав теперь логическую сумму трех произведений, придем к формуле $\Phi=F_1\vee F_2\vee F_3=a\wedge\bar{b}\wedge c\vee a\wedge b\wedge c\vee \bar{a}\wedge b\wedge c$. Непосредственной проверкой легко убедиться, что полученная формула дает именно заданную функцию.

Точно так же строится формула для функции, заданной перечислением всех наборов аргументов, для которых она равна 0. Пусть, например, эти наборы таковы:

$$a=0; \quad b=1; \quad c=1;$$

$$a=1; \quad b=0; \quad c=0;$$

$$a=0; \quad b=0; \quad c=0.$$

Построим суммы $a\vee\bar{b}\vee\bar{c}$, $\bar{a}\vee b\vee c$, $a\vee b\vee c$ и образуем их логическое произведение $F=(a\vee\bar{b}\vee\bar{c})\wedge(\bar{a}\vee b\vee c)\wedge(a\vee b\vee c)$. Как и выше, легко убедиться, что эта

Таблица 6

Таблица значений логической функции «штрих Шеффера»

Аргументы		Функция $F(a, b)$
a	b	
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Таблица 7

Таблица значений логической функции «функция Пирса»

Аргументы		Функция $F(a, b)$
a	b	
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

функция обращается в 0 на заданных наборах аргументов и только на них. Таким образом, мы убедились, что любую логическую функцию можно представить в виде комбинаций функций И, ИЛИ, НЕ. Такая система логических функций, достаточная для получения любых других, называется функционально полной. Эта система не является единственной функционально полной, возможны и другие.

Одной из функционально полных является логическая функция «штрих Шеффера». Она задается с помощью таблицы (табл. 6). Ее можно записать в виде $F(a, b) = (\bar{a} \wedge \bar{b}) = \bar{a} \vee \bar{b}$. Другой функционально полной является «функция Пирса», которая задается таблицей (табл. 7). Она выражается формулой $F(a, b) = \overline{(\bar{a} \vee \bar{b})} = \bar{a} \wedge \bar{b}$. Каждая из этих двух функций образует функционально полную систему, т. е. любая логическая функция может быть выражена через одну или другую. Наиболее часто используемые логические функции приведены в табл. 8.

Сопоставляя значения функций F_2 — F_9 , приведенные в табл. 8, можно установить, что F_2 и F_6 , F_3 и F_7 , F_4 и F_8 , F_5 и F_9 попарно взаимно инверсны, т. е. являются отрицанием одна другой, принимая на одних и тех же наборах переменных противоположные значения:

$$F_2 = \bar{F}_6, \bar{F}_2 = F_6 \text{ или } x_1 \vee x_2 = \overline{x_1 \downarrow x_2}, \overline{x_1 \vee x_2} = x_1 \downarrow x_2;$$

$$F_3 = \bar{F}_7, \bar{F}_3 = F_7 \text{ или } x_1 x_2 = \overline{x_1 \uparrow x_2}, \overline{x_1 x_2} = x_1 \uparrow x_2;$$

$$F_4 = \bar{F}_8, \bar{F}_4 = F_8 \text{ или } x_1 \rightarrow x_2 = \overline{x_1 \leftarrow x_2}, \overline{x_1 \rightarrow x_2} = x_1 \leftarrow x_2;$$

$$F_5 = \bar{F}_9, \bar{F}_5 = F_9 \text{ или } x_1 \infty x_2 = \overline{x_1 \oplus x_2}, \overline{x_1 \infty x_2} = x_1 \oplus x_2.$$

Приведенные выше соотношения показывают возможности выражения одних логических функций через другие. Функции являются элементарными, и с их помощью

Таблица логических функций, наиболее часто используемых в вычислительной технике

Функции	Значения переменных					
	$x=0$	$x=1$	$x_1=0$ $x_2=0$	$x_1=1$ $x_2=0$	$x_1=0$ $x_2=1$	$x_1=1$ $x_2=1$
Отрицание $F_1(x) = \bar{x}$	1	0	—	—	—	—
Дизъюнкция $F_2(x_1, x_2) = x_1 \vee x_2$	—	—	0	1	1	1
Конъюнкция $F_3(x_1, x_2) = x_1 \wedge x_2$	—	—	0	0	0	1
Импликация $F_4(x_1, x_2) = x_1 \rightarrow x_2$	—	—	1	0	1	1
Равнозначность $F_5(x_1, x_2) =$ $= x_1 \sim x_2$	—	—	1	0	0	1
Операция Пирса $F_6(x_1, x_2) = x_1 \downarrow x_2$	—	—	1	0	0	0
Операция Шеффера $F_7(x_1, x_2) =$ $= x_2 \uparrow x_2$	—	—	1	1	1	0
Операция запрета $F_8(x_1, x_2) =$ $= x_1 \leftarrow x_2$	—	—	0	1	0	0
Неравнозначность $F_9(x_1, x_2) =$ $= x_1 \oplus x_2$	—	—	0	1	1	0

можно выразить любую сложную логическую функцию, т. е. представить ее в виде эквивалентной совокупности элементарных функций.

Приведем примеры функционально полных систем:

$$F_2 = x_1 \vee x_2; F_3 = x_1 x_2; F_1 = \bar{x};$$

$$F_2 = x_1 \vee x_2; F_1 = \bar{x};$$

$$F_3 = x_1 x_2; F_1 = \bar{x};$$

$$F_6 = x_1 \downarrow x_2;$$

$$F_7 = x_1 \uparrow x_2.$$

Во многих случаях в качестве базовой функционально полной используется первая система. Набор элементов, отвечающих любой функционально полной системе элементарных логических функций, называется функционально полным набором логических элементов.

Логические элементы именуются в соответствии с реализуемыми функциями. Для реализации отрицания используется инвертор (элемент НЕ), для реализации конъюнкции — элемент И, для реализации дизъюнкции — элемент ИЛИ, для реализации операции Шеффера — элемент Шеффера (элемент И — НЕ), для реализации операции Пирса — элемент Пирса (элемент ИЛИ — НЕ). Если в ЭВМ для изображения двоичных сигналов используют электрические сигналы, то в оптоэлектронных процессорах для передачи информации

применяют свет: наличие света — 1, отсутствие света — 0. Для иллюстрации рассмотрим способы оптоэлектронного выполнения основных логических операций с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС). Пространственно-временной модулятор света представляет собой дискретное светоклапанное устройство, выполненное в виде матрицы, каждый элемент которой предназначен для осуществления логической операции над одним битом информации. Пропускание света отдельным элементом управляется электрическим полем. В отсутствие поля весь материал прозрачен и имеет одинаковые оптические свойства. При подаче электрических потенциалов на оптически прозрачные электроды, нанесенные на плоские поверхности ПВМС, оптические свойства материала изменяются. Обозначим буквой T ПВМС, пропускающий свет при наличии сиг-

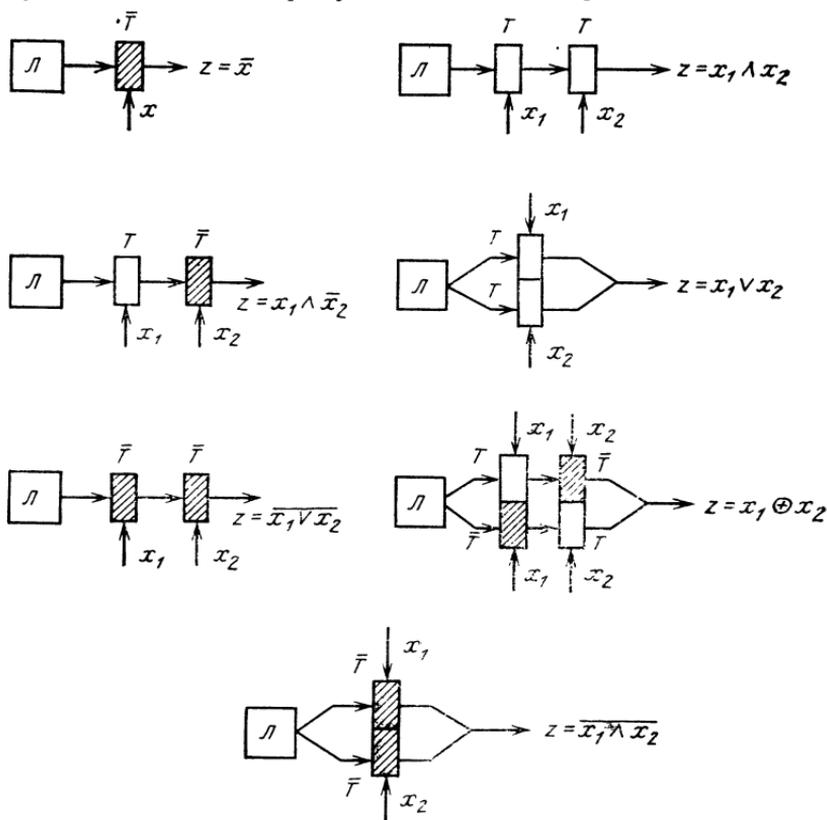


Рис. 2. Примеры выполнения логических операций с помощью ПВМС управляемых электрическими сигналами

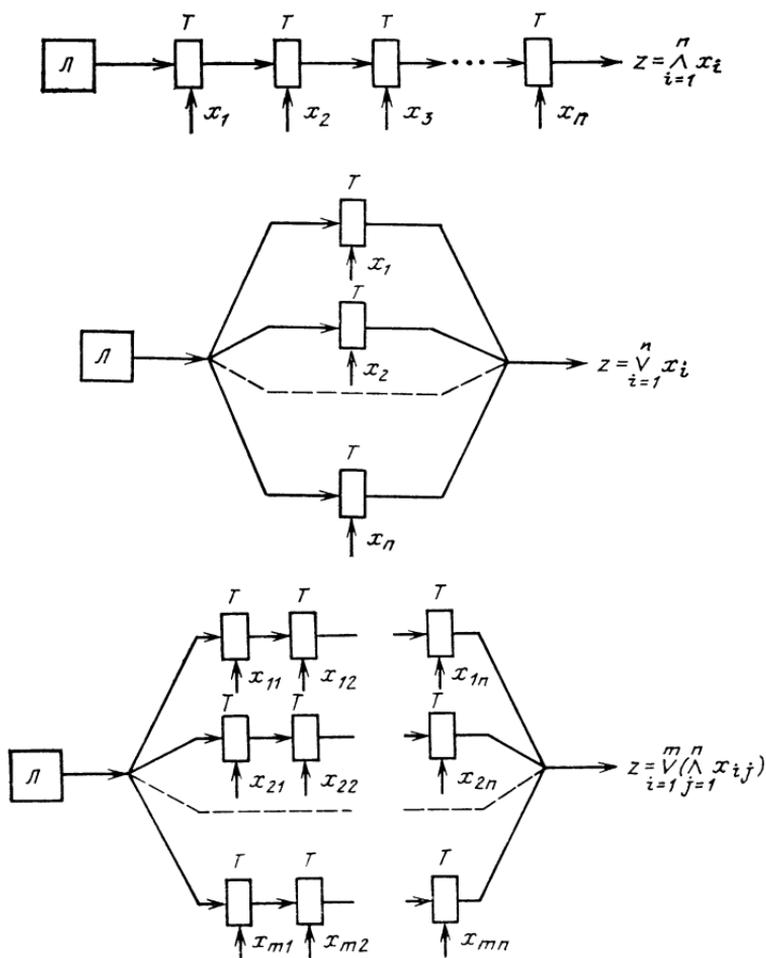


Рис. 3. Примеры выполнения логических операций над многими переменными с помощью ПВМС, управляемых электрическими сигналами

нала ($x=1$), буквой \bar{T} — в отсутствие сигнала. На рис. 2 показаны способы выполнения различных логических операций с помощью ПВМС. Схемы, представленные на рис. 3, осуществляют многоместную конъюнкцию

$z = \bigwedge_{i=1}^n x_i$, многоместную дизъюнкцию $z = \bigvee_{i=1}^n x_i$ и бу-

леву функцию $z = \bigvee_{i=1}^m \left(\bigwedge_{j=1}^n x_{ij} \right)$.

2. Основные требования к логическим элементам оптоэлектронных процессоров

Принципы построения цифровых оптоэлектронных вычислительных систем могут значительно отличаться один от другого и в сильной степени зависеть от конкретной элементной базы, обеспечивающей выполнение вычислительных операций над оптическими сигналами. Главная задача заключается в выборе оптимального сочетания физических принципов, материалов и технологии для элементной базы дискретной оптоэлектронной вычислительной техники. Накопленный в процессе развития вычислительной техники опыт позволяет сформулировать и обобщить систему требований к новому виду элементной базы.

Вся совокупность требований может быть разделена на четыре группы: требования к логическим элементам (А), физические требования к элементам (Б), схемотехнические требования (В) и технологические требования (Г).

А. Требования к логическим элементам. Их выполнение обеспечивает осуществление полной совокупности логических операций запоминания и воспроизведения информации и сводится к наличию следующих обязательных элементов:

1) каналов передачи информации, допускающих объединение сигналов на входах отдельных элементов и разветвление их на выходах;

2) пороговых элементов, осуществляющих различные квантовых уровней сигнала (0 и 1 в двоичном коде);

3) логических элементов, реализующих полную систему логических функций, т. е., по крайней мере, один из следующих четырех наборов логических элементов: конъюнкция (И) и отрицание (НЕ); дизъюнкция (ИЛИ) и отрицание (НЕ); штрих Шеффера (И — НЕ); стрелка Пирса (ИЛИ — НЕ);

4) элементов памяти, позволяющих записывать, хранить и воспроизводить информацию;

5) усилительных элементов, восстанавливающих энергию сигнала до стандартного уровня.

Элемент отрицания и усилительный элемент являются обязательными в системе элементов универсальной обработки информации. Отсутствие элемента НЕ исключает универсальную логическую обработку и допускает лишь проведение узкого класса аналоговой обработки

сигналов. Отсутствие усилительного элемента позволяет создавать лишь узкий класс систем без обратной связи с ограниченным числом каскадов обработки.

Б. Физические требования. Выполнение требований группы А может быть достигнуто с помощью разнообразных оптических и фотоэлектрических явлений, которые характеризуются следующими показателями:

1) эффективным усилением сигнала, обеспечивающим большие значения полосы усиления B , т. е. произведение коэффициента усиления G на полосу пропускания Δf ;

2) сильной и малоинерционной нелинейностью преобразования сигнала, обеспечивающей резкий порог срабатывания и быстродействия логического элемента;

3) наличием физических элементов, пригодных для создания элемента памяти, сочетающего высокую чувствительность по отношению к управляющему сигналу с малой инерционностью изменения состояния;

4) большой шириной полосы пропускания каналов связи между элементами;

5) малым значением энергии на 1 бит обрабатываемой информации, т. е. произведением мощности управляющего сигнала на время срабатывания логического и запоминающего элементов, или высокой энергетической добротностью, выражаемой количеством операций на единицу затраченной энергии;

6) возможностью выполнения требований по п. 1), 2), 3) в малых физических объемах.

В. Схемотехнические требования должны обеспечивать возможность конструктивного объединения отдельных элементов в схемы, способные выполнять заданные функции обработки сигналов:

1) идентичность элементов в схеме;

2) стандартное представление сигнала, а также идентичность в пределах определенных допусков входных и выходных параметров логических элементов;

3) комплекс технологических средств, обеспечивающий объединение отдельных элементов в функциональные устройства;

4) исключение взаимовлияния отдельных элементов при объединении их в систему, т. е. существование эффективной развязки, что обеспечивает их устойчивость по отношению к перекрестным помехам;

5) надежность и стабильность характеристик элементов в схеме, а также достаточный срок службы.

Г. **Технологические требования** сводятся к возможности реализации требований группы В:

1) наличие материалов с требуемыми параметрами для изготовления элементов и схем;

2) наличие технологических процессов для получения достаточно совершенных материалов;

3) существование технологических методов, обеспечивающих объединение отдельных элементов в схемы;

4) воспроизводимость элементов, в том числе и по разбросу параметров, обеспечивающая экономически приемлемый выход годных изделий;

5) наличие технологического оборудования, обеспечивающего выполнение условий п. 1)–4).

Многие из приведенных требований хорошо известны и могут показаться тривиальными. Однако выполнение всей совокупности требований — задача далеко не простая, и нарушение любого из них может сделать непригодной или, по крайней мере, неконкурентоспособной элементную базу на любых новых принципах, сколь бы привлекательными они ни казались.

Ввиду того что эффективные чисто оптические активные элементы усиления и нелинейного преобразования света в настоящее время не известны, основной путь построения высокопроизводительных оптических устройств и систем обработки информации заключается в отыскании удачного компромиссного сочетания пассивных оптических элементов, осуществляющих преобразование когерентных световых сигналов с активными элементами полупроводниковой электроники. Такой подход позволяет оценить предельную скорость оптической цифровой обработки информации.

Для усилительных и аналоговых элементов энергетическая добротность определяется как $K = G^{1/2} \Delta f / P$, где P — мощность рассеяния элемента; G — коэффициент усиления по мощности; Δf — ширина полосы пропускания. Энергетическая добротность K представляет собой величину, обратную количеству энергии источника питания, приходящейся на одну логическую операцию, и имеет смысл числа логических операций, которые может выполнить один элемент на единицу затраченной энергии.

Для элементов современных электронных интегральных микросхем достигнуты значения $K = 10^{11} - 10^{13}$ Дж⁻¹, предельное же значение энергетической добротности составляет $K_0 = 10^{16}$ Дж⁻¹. Важность величины K состоит

в том, что в условиях ограничения мощности рассеяния она определяет максимально допустимую плотность потока обработки информации. Тепловой предел определяется максимальным теплоотводом с поверхности, например, интегральной микросхемы, который в условиях естественного охлаждения характеризуется величиной $Q \approx 10^{-1}$ Вт/см². При заданной частоте переключения элементов f и коэффициенте усиления G энергетическая добротность K определяет верхний предел плотности размещения элементов на плоскости схемы, т. е. $N \leq KQS/Gf$. Если N элементов занимают площадь S , то максимальная производительность такой схемы определяется соотношением

$$I_0 = Nf = KQS/G. \quad (1)$$

Отсюда, считая, что практически можно достичь значений $K = 10^{13}$ Дж⁻¹, $Q \approx 1$ Вт/см², $S = 10$ см², а для модуляции оптических свойств пассивных оптических элементов достаточно коэффициента усиления $G \approx 10 - 10^2$, то максимальная производительность схемы может составлять $10^{12} - 10^{13}$ бит/с.

Конечная скорость распространения световых и электрических сигналов по цепям управления вносит определенные ограничения, связанные с требованиями синхронизации работы отдельных элементов оптоэлектронных цифровых вычислительных систем. При линейных размерах линз и ПВМС, равных 10 см, разность хода в оптической системе не превышает размеров оптических элементов, т. е. 10 см. Считая, что временное рассогласование для различных элементов системы должно быть не более определенной доли γ от тактового периода $T = 1/f_T$, получаем для максимально допустимой тактовой частоты $f_T = \gamma C/L = 100$ МГц при $\gamma = 1/30$. Следовательно, характерная частота обработки информации в оптоэлектронной цифровой вычислительной системе с предельными параметрами должны быть около 10^8 Гц, а максимальный формат чисел $N_{\max} = 10^5 - 10^6$.

Интересно отметить, что для практически необходимого формата чисел $N = 10^4$ и площади ПВМС $S = 10$ см² размер одного элемента изображения составляет около 300 мкм и весьма далек от дифракционного предела $\lambda / \sqrt{\Omega}$, где λ — длина волны света, Ω — входная угловая апертура линзы. Избыточность при передаче такого изображения $R = S\Omega/\lambda^2 m^2 N$, где m — наивысший дифракционный порядок, требуемый для качественной пе-

передачи бинарного изображения числа. При $\lambda = 6 \cdot 10^{-5}$ см, $\Omega = 10^{-1}$ стр, $N = 10^4$, $S = 10$ см². $m = 3$ линза диаметром 4 см дает избыточность $R = 3 \cdot 10^3$, что обеспечивает большой запас на абберационные допуски и высокую помехоустойчивость передачи изображения.

Отметим, что способ ввода и вывода сигналов в вычислительной схеме играет существенную роль. Если ввод и вывод сигналов осуществляется через периферию схемы, как это имеет место в чисто электронных интегральных микросхемах, то ее производительность для схем с достаточно большим числом элементов N пропорциональна скорости ввода-вывода, т. е. $I_e \sim f_T N^{1/2}$, так как число выходных каналов пропорционально \sqrt{N} . Отсюда следует, что для электронных интегральных микросхем

$$I_e \approx b \cdot (K_e Q S_{efT} / G_e)^{1/2}, \quad (2)$$

где b — геометрический фактор.

В оптоэлектронных схемах входной и выходной каналы к логической схеме являются двумерными, что обеспечивает одновременный доступ ко всем элементам схемы и производительность схемы согласно (1) определяется величиной I_0 . Сравнение правых частей выражений (1) и (2) отчетливо показывает, что параллельный доступ к логическим элементам оптоэлектронной или электронной интегральной схемы позволяет поднять функциональную производительность этой схемы.

На рис. 4,б представлен двухвходовый логический элемент, выполняющий функции И, ИЛИ. На фотодиоды поступает информация о состоянии логических переменных x_1 и x_2 . Сигналы от фотоприемников поступают на электронный логический ключ, выполняющий одну из операций и усиливающий сигнал. Усиленный сигнал управляет оптическим модулятором отражательного типа, использующим, например, линейный электрооптический эффект. На оптический модулятор падает внешнее линейно-поляризованное излучение. Отраженный от ПВМС свет будет только в том случае, если оба входных сигнала совпадают (электронный ключ выполняет операцию И) или если присутствует хотя бы один из входных сигналов (электронный ключ выполняет операцию ИЛИ).

На рис. 4,а представлено схематическое изображение элемента отрицания. Входной сигнал поступает на фотодиод, который преобразует световые сигналы в электри-

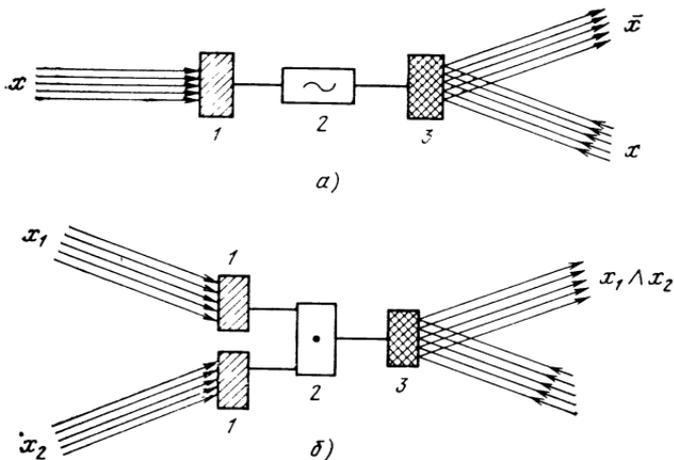


Рис. 4. Варианты построения логических элементов с использованием полупроводниковых электронных переключающих элементов и управляемых пассивных оптических элементов:

а — элемент отрицания (1 — фотоприемник; 2 — инвертор-усилитель электрического сигнала; 3 — светомодулирующий элемент); *б* — двухвходовый логический элемент, выполняющий функции И, ИЛИ (1 — фотоприемники; 2 — логический элемент, выполняющий функцию И; 3 — оптический модулятор отражательного типа)

ческие; электрический же сигнал инвертируется электронными устройствами. Выходной сигнал управляет отражением оптического модулятора. Если на вход не поступает сигнал, то ячейка ПВМС отражает падающий на нее извне оптический сигнал, в противоположном случае коэффициент отражения минимален (в пределе равен 0).

Пороговые свойства фотоприемников обеспечивают распознавание квантованных уровней сигналов, т. е. 0 и 1 в двоичном коде. Усилительный элемент в схеме восстанавливает энергию сигнала до стандартного уровня, обеспечивающего управление пропусканием или отражением пассивного оптического элемента. Энергия в отраженном сигнале берется из внешнего источника когерентного излучения. Электронная часть схемы обеспечивает полноту системы логических функций булевой алгебры, а наличие в составе электроники динамического триггера обеспечивает выполнение ПВМС роли динамического элемента памяти. В этом случае отраженный сигнал может быть и тогда, когда входные сигналы отсутствуют.

Рассмотрим, в какой мере цифровые оптоэлектрон-

ные логические элементы удовлетворяют системе требований к новому виду элементной базы. Ниже в табл. 9 знаками «+» отмечены требования, выполнение которых возможно, знаком «—» — условия, ответ на которые выяснен не полностью или соответствующий вопрос еще не изучен. По отдельности хорошо изучены как вопросы создания необходимых электронных компонентов, так и многочисленные электрооптические и магнитооптические эффекты в твердом теле. Как видно из таблицы, проработке подлежат вопросы создания быстродействующих матричных ПВМС, в которых бы методами интегральной технологии сочетались бы электронная и оптическая части.

Таблица 9

Степень выполнения требований к элементной базе
оптоэлектронных цифровых процессоров

Группы требований	Номер требования в группе					
	1	2	3	4	5	6
А. Требования к логическим элементам	+	+	+	+/-	+	
Б. Физические требования	+	+	+/-	+	+/-	+
В. Схемотехнические требования	+	+	—	+	—	
Г. Технологические требования	+/-	+	—	—	+/-	

Следует отметить, что в ряде случаев светоклапанный элемент может быть заменен светоизлучающим. На основе матричных фотоприемников и светодиодов, изготовленных методами интегральной микроэлектроники, может быть создан сложный матричный оптрон. Для матричных оптронных систем можно рассчитывать на размер матрицы, состоящей из фотоприемников, логических ключей и светодиодов, порядка 10^4 элементов со временем цикла около 10^{-7} с, что обеспечит пропускную способность около 10^{11} бит/с. Большая расходимость излучения светодиодов потребует в этом случае использования волоконной оптики для передачи и трансформирования изображений.

3. Элементная база оптоэлектронных цифровых процессоров

Общая схема тракта многоканальной цифровой оптической обработки информации показана на рис. 5. Вход-

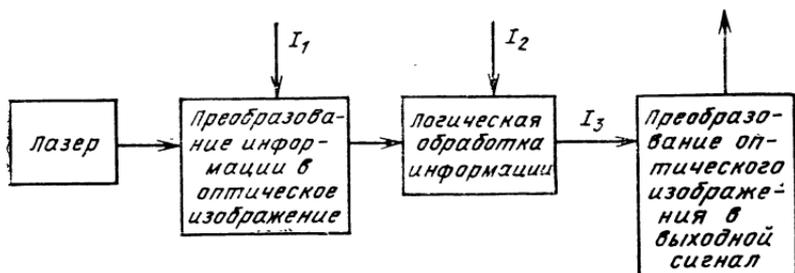


Рис. 5. Общая схема тракта многоканальной цифровой оптической обработки информации

ной поток информации I_1 , подлежащий обработке, превращается в оптическое изображение. Второй поток информации I_2 , определяющий программу обработки для I_1 , поступает в блок логической обработки. Результирующий поток информации I_3 преобразуется в выходной сигнал. В этом же блоке происходит передача изображений для дальнейшей обработки, а также превращение оптической информации в электрические сигналы. Скорость обработки информации существенно зависит от скорости ввода потоков информации I_1, I_2 в блок логической обработки. Существуют два основных способа образования изображений и ввода их в канал оптической обработки, обеспечивающих достаточно большую скорость ввода. Первый способ (рис. 6) предназначен для ввода информации, поступающей в виде последовательности электрических сигналов сразу по нескольким входным каналам. Он осуществляется посредством электри-

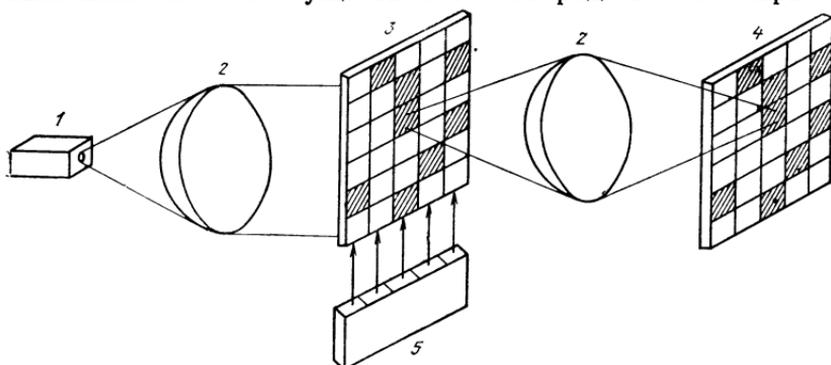


Рис. 6. Ввод информации в устройство оптической обработки информации с помощью электрически управляемого транспаранта:

1 — источник излучения; 2 — линзы; 3 — многоэлементный, электрически управляемый ПВМС; 4 — вход последующего элемента устройства обработки информации; 5 — устройство управления транспарантом

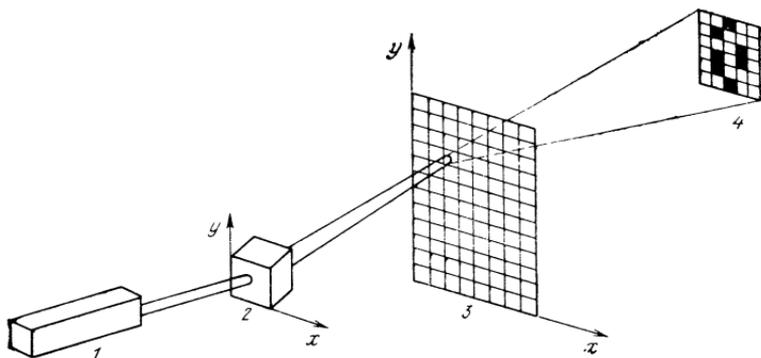


Рис. 7. Ввод информации в устройство оптической обработки информации с помощью голографического запоминающего устройства: 1 — лазер; 2 — многопозиционный дефлектор; 3 — матрица голограмм; 4 — вход устройства обработки информации

чески управляемого матричного ПВМС, который формирует изображение построчно и запоминает информацию до момента считывания.

Второй способ предназначен для ввода алгоритмов решения задач, инструкций, постоянных величин. Эти данные хранятся в постоянной (оперативной) оптической памяти. Способ ввода информации из оптической памяти показан на рис. 7. Информация в оптической памяти хранится в отдельных ячейках плоской матрицы в виде голограмм. Для считывания применяется устройство адресации лазерного излучения, направляющего луч в ячейку с заданным номером. Адресное устройство представляет собой многопозиционный дефлектор лазерного луча с произвольной адресацией. Двумерное изображе-

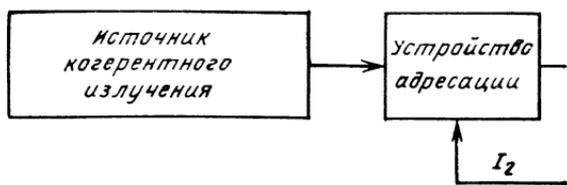
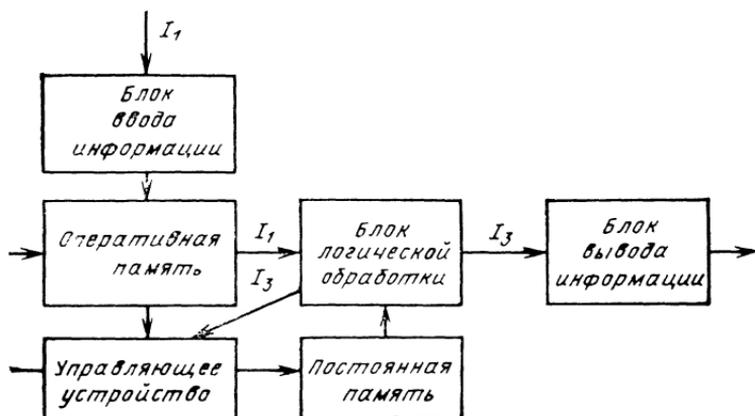


Рис. 8. Структурная схема оптоэлектронного процессора

ние, считанное с голограммы, подается на ПВМС с оптическим входом и модулирует его функцию пропускания или отражения. Ввод в оптически управляемый ПВМС осуществляется одновременно по всем оптическим каналам.

На рис. 8 показана структурная схема цифрового оптоэлектронного процессора. Таким образом, для построения цифровых многоканальных оптоэлектронных процессоров необходимы следующие устройства:

1. Лазеры.
2. Многопозиционные дефлекторы светового луча с произвольной адресацией.
3. Многоэлементные электрически управляемые пространственно-временные модуляторы света с функциями запоминания (ЭУТ).
4. Многоэлементные оптически управляемые пространственно-временные модуляторы света (ОУТ), способные выполнять функции И, ИЛИ, НЕ и усиливать изображение за счет энергии излучения, падающего на отражающую поверхность ОУТ. Наиболее важными являются операции инверсии и усиления сигнала. Выполнение же операции конъюнкции и дизъюнкции может быть обеспечено схемотехническими решениями.
5. Постоянные и оперативные оптические накопители — запоминающие среды. В ряде случаев функцию оптической оперативной памяти может выполнять оптически управляемый ПВМС с функциями запоминания.
6. Оптические элементы, обеспечивающие сборку, сдвиг, маскирование и транспонирование числовых картин.



Следует еще добавить обычные элементы формирования оптических изображений: линзы, зеркала, поляризаторы и т. п. Перечисленные устройства образуют элементную базу, достаточную для построения оптических цифровых вычислительных машин универсального назначения. Рассмотрим основные узлы оптоэлектронных процессоров.

Источники излучения. В оптоэлектронных процессорах в качестве источников излучения предполагается использовать лазеры, которые могут обеспечить необходимую мощность, направленность, монохроматичность и когерентность излучения. В настоящее время существует большое разнообразие типов лазеров, обладающих самыми различными физическими и эксплуатационными характеристиками. Остановимся на некоторых из них, учитывая вышеуказанные требования, а также необходимость непрерывной генерации.

Среди твердотельных лазеров следует отметить лазеры на алюмоитриево-гранате, активированном неодимом, излучающие на длине волны 1,06 мкм. Высокая мощность является основным их преимуществом. Однако они обладают рядом недостатков: работа в инфракрасной области спектра, низкий КПД, особенно с учетом преобразования излучения в видимый диапазон, плохая когерентность.

В настоящее время большое внимание уделяется разработкам лазеров на жидкостях. В качестве рабочего тела в них обычно используют растворы органических и неорганических красителей. Отличительной особенностью таких лазеров является возможность перестройки частоты излучения в широком диапазоне. Однако большей частью лазеры на красителях обладают недостаточной степенью монохроматичности и требуют обычно мощной оптической накачки от второго лазера, так что суммарный КПД их низок. Таким образом, использование твердотельных и жидкостных лазеров в оптоэлектронных процессорах представляется проблематичным. Более перспективны для применений газовые и полупроводниковые лазеры. Остановимся на следующих типах газовых лазеров: лазеры на атомарных газах, типичным представителем которых является гелий-неоновый лазер; ионные лазеры — аргоновый и криптоновый; лазеры на парах металлов, среди которых наиболее известны гелий-кадмиевый, гелий-селеновый и медный.

Наиболее распространенным является гелий-неоновый лазер — первый из созданных газовых лазеров. Гелий-неоновый лазер имеет линии генерации в видимом и инфракрасном диапазонах, из которых естественный интерес представляет красная линия 0,63 мкм. Длина когерентности излучения составляет десятки сантиметров, выходная мощность — десятки милливольт в непрерывном режиме генерации с одной поперечной модой, КПД лазера составляет сотые доли процента. В ионных лазерах используются электронные переходы ионов аргона, криптона и других инертных газов. Накачка при этом осуществляется с помощью сильноточного дугового разряда, возбуждаемого в узком капилляре лазерной трубки. Наиболее распространенные аргоновый и криптоновый ионные лазеры обладают высокой мощностью излучения (1—100 Вт) в непрерывном режиме, достаточно большой длиной когерентности (около 10 см) для каждой отдельной линии. Ввиду больших то-

ков накачки необходимо охлаждение трубки. Достаточно хорошими характеристиками обладает гелий-кадмиевый лазер, у которого мощность непрерывной генерации составляет десятки и сотни милливатт на длине волны 0,44 мкм.

Полупроводниковые инжекционные лазеры отличаются от других типов лазеров как по физическим процессам, протекающим в них, так и по возможностям их применения в оптоэлектронных процессорах. Они обладают высокой эффективностью преобразования подводимой энергии в энергию когерентного излучения. Инжекционные лазеры весьма компактны, по питанию они совместимы с интегральными схемами полупроводниковой электроники. Время установления режима генерации 10^{-9} с. Инжекционные лазеры обладают достаточной когерентностью для построения на их основе голографических запоминающих устройств. Линейки и матрицы инжекционных лазеров позволяют упростить системы отклонения излучения. Срок службы инжекционных лазеров составляет более 10^4 ч и непрерывно повышается. Средняя мощность излучения в непрерывном одномодовом режиме составляет 5—10 мВт.

Из сравнения характеристик основных типов лазеров, представленных в табл. 10, следует, что инжекционные лазеры являются уникальными по своим характеристикам источниками когерентного излучения для построения высокопроизводительных цифровых оптоэлектронных систем. Для экспериментальных систем может быть использован довольно широкий круг лазеров.

Таблица 10

Сравнительные характеристики различных типов лазеров

Лазеры	Мощность генерации, МВт	Расходимость излучения, мрад	Длина волны излучения, Å	Длина когерентности, см	КГД, %
He-Ne (гелий-неоновый)	10—50	0,5	6328	10—30	$7 \cdot 10^{-2}$
ЛГ-106М (аргоновый)	1 Вт	1	4880 (основная)	5	10^{-2}
ЛГ-31 (гелий-кадмиевый)	50	0,5	4416	20	10^{-1}
$Al_xGa_{1-x}As$ (инжекционный)	5	10^2 — $5 \cdot 10^2$	7000—9000	0,1—100	10 —50

Многопозиционные дефлекторы. Они предназначены для изменения по заданному закону пространственного положения излучения лазера. В системах голографической памяти с помощью дефлекторов осуществляется произвольная выборка содержимого ячейки памяти. В основе работы дефлекторов могут лежать различные физические явления: электрооптические, акустооптические, магнитооптические.

Электрооптические дефлекторы дискретного типа являются многоступенчатыми. Каждая ступень состоит из поляризатора, электрооптического переключателя плоскости поляризации и отклоняющего элемента. Поляризатор предназначен для превращения излучения в линейно-поляризованное. Поляризационный переключатель служит для изменения направления поляризации входного

луча на угол 90° . Его можно изготавливать из материала, обладающего линейным электрооптическим эффектом, например кристаллов $K_2H_2PO_4$, $NH_4H_2PO_4$, $LiNbO_3$ и др., а также магнитооптическим эффектом $Y_3Fe_5O_{12}$, C_2Vg_3 и др. Отклоняющий элемент обеспечивает пространственное или угловое разделение световых пучков с взаимно ортогональной поляризацией.

Основными параметрами дискретных электрооптических дефлекторов являются: количество используемых каскадов отклонения, число позиций светового луча, рабочая длина волны излучения, быстродействие (время, требуемое для перехода с одного элемента разрешения на соседний), коэффициент пропускания излучения, фоновая засветка в отключенных элементах разрешения, полувольновое электрическое напряжение переключения излучения. Дискретные дефлекторы могут быть как однокоординатными, так и двухкоординатными.

Возможность отклонения световых лучей с помощью акустических волн основана на периодическом пространственном изменении плотности среды под воздействием акустических волн, которое приводит к периодическому пространственному изменению ее показателя преломления. Акустические волны образуют в среде фазовую решетку, период которой является длиной акустической волны. При прохождении светового пучка сквозь среду с изменяющимся по синусоидальному закону показателем преломления возникает дифракция света. Если световой пучок падает на бегущую акустическую волну под вполне определенным углом, то наблюдается дифракция только первого порядка — дифракция Брэгга. При изменении частоты акустической волны происходит изменение направления отклоненного луча. В брэгговских дефлекторах могут использоваться как жидкие, так и твердые изотропные и анизотропные материалы. Высокой оптико-акустической эффективностью обладают TeO_2 , $PbMoO_4$, $\alpha-HgS$, $\alpha-HgHfO_3$, Ag_3AsSe_3 и многие другие материалы.

Акустооптические дефлекторы характеризуются следующими параметрами: углом отклонения луча и разрешающей способностью, быстродействием, оптической эффективностью (отношение прошед-

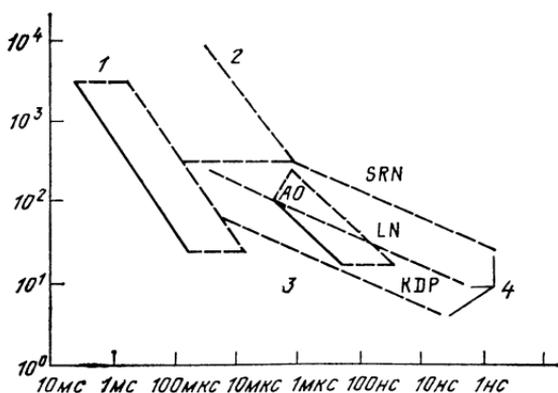


Рис. 9. Сравнительная оценка потенциальных возможностей дефлекторов различных типов:

1 — галванометры; 2 — механические дефлекторы; 3 — акустооптические дефлекторы; 4 — электрооптические дефлекторы

Основные параметры выпускаемых дефлекторов

Фирма-изготовитель	Модель	Рабочая длина на волны, мм	Число разрезанных поперечных сечений (по критерию Рэля)	Диаметр радиуса частот, МГц	Эффективность, %	Угол наклона боковой поверхности, Вт	Материал звукопровода да	Оптическая апертура, мм	Время переключения, мкс	Примечания
SORO	250K	0,44—0,7 0,44—0,7	800	150—300	50	—		20	5,5	
			1000	150—300	50	—		24	7,5	
ISOMET	400-X 400-X	0,514 0,514	650	75—125	50	3,5		8×7	13	Двухкоординатный дефлектор
			400×400	75—125	50	3,5		∅6,6	10,7	
	401-1X 401-2X	0,44 0,488—	320	85—125	—	1,5		∅6,6	10,7	" "
			400	75—125	—	2		∅6,6	10,7	
	401-5X 401-7X	0,514 0,6328 1,06	400	75—125	—	3		∅6,6	10,7	" "
			180	35—55	—	4		∅7	12	
Zenith	70	0,6328	400	50—90	В центре 70, на краях 60	3,5	Стекло	38,6×2	10	
Zenith	150	0,6328	1000	100—200	В центре 50, на краях 40	9		41×2	10	

шей через дефлектор и падающей на него интенсивности излучения), потребляемой при переключении электрической мощностью, центральной (средней) частотой акустической волны, для которой выполняется условие Брэгга, диапазоном изменения управляющей частоты, обеспечивающей сканирование светового пучка.

На рис. 9 приведена сравнительная оценка одномерных дефлекторов и их потенциальных возможностей при условии, что в дефлекторах используют оптимальные материалы для каждого типа дефлектора (для электрооптических LiNbO_3 , SBN, для акустооптических $\alpha\text{-HfO}_2$, PbMoO_4 , TeO_2). Сравнение проводится в рамках зависимости возможной разрешающей способности от времени развертки. Из рисунка следует, что существует практическая возможность создания двумерных многопозиционных дефлекторов с числом позиций 10^4 и частотой переключения до десяти и выше мегагерц. В табл. 11 представлены основные параметры промышленных дефлекторов.

Многоэлементные матричные ПВМС с электрическим управлением. Эффективность применения управляемых транспарантов в системах оптической обработки информации в первую очередь определяется свойствами его рабочего материала. Материал электрически управляемого транспаранта должен отвечать следующим основным требованиям: большая эффективность преобразования оптического сигнала η ($\eta = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}}$, где $I_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$ — интенсивности сигнала на входе и выходе транспаранта соответственно) при максимальном оптическом контрасте или глубине модуляции; высокая чувствительность к управляющему сигналу, обеспечивающая уменьшение энергетических затрат на переключение элементов транспаранта; наличие эффекта памяти (долговременной памяти, требующей специального сигнала для возвращения материала в исходное состояние или памяти релаксационного типа), т. е. способности сохранять включенное состояние на время, необходимое для считывания всего массива информации; отсутствие «усталости» в течение периода эксплуатации; быстроедействие переключения, обеспечивающее необходимую скорость ввода-вывода.

Применение материалов в электрически управляемых транспарантах, предназначенных для преобразования электрических сигналов в световые, обуславливает наличие у них пороговых свойств или существенно нелинейной характеристики переключаемого элемента, что важно для высокого отношения сигнал-шум. Такая характеристика особенно важна при матричном адресовании элементов электрическим напряжением, поскольку позволяет уменьшить до минимума так называемый «кросс-эффект». При матричном адресовании, или его

еще называют построчным, управление осуществляют по $2\sqrt{N}$ каналам, где N — число элементов ЭУТ.

Наиболее распространенными и эффективными являются жидкокристаллические ЭУТ. Однако скорости формирования массивов у них находятся в миллисекундном диапазоне. Быстродействующие ЭУТ могут быть созданы на основе PLZT-керамики.

Структура PLZT представляет собой горячепрессованную смесь $PbZrO_3$, $PbTiO_3$ и лантана состава $x/y/z$, где x — атомный процент лантана, а y/z — отношение цирконата к титанату свинца. Варьируя состав смеси и режим горячего прессования, можно получить керамику с теми или иными структурными и оптическими свойствами, с долговременной памятью или без нее. Наблюдаемые эффекты являются результатом ориентации в электрическом поле вектора поляризации сегнетоэлектрических доменов. Как следствие этого, происходит переориентация оптических осей зерен кристаллов, обладающих явно выраженным двулучепреломлением. В керамике существует несколько эффектов, в принципе, пригодных для пространственной модуляции света: продольный электрооптический эффект в напряженной керамике, поперечный электрооптический эффект, «краевой» эффект и эффект рассеяния света в крупнозернистой керамике. Говоря о динамических возможностях ЭУТ на основе электрооптической керамики, можно в качестве примера привести 256-элементный формирователь страниц фирмы «Sandia», способный работать со скоростью переключения до 10^5 при контрастном отношении 1000 : 1.

Для создания транспарантов с индивидуальным адресованием можно использовать параэлектрическую PLZT керамику без памяти, отличающуюся более высокой скоростью оптического переключения — десятки наносекунд.

Быстродействующие ПВМС могут строиться на основе монокристаллических сегнетоэлектриков. Эти материалы электрически бистабильны и пригодны для транспарантов с памятью. Механизм их действия основан на переключении спонтанной поляризации, которая сопровождается существенным изменением оптических свойств кристалла. Кристаллы титаната висмута $Bi_4Ti_3O_{12}$ обладают малым временем переключения 1 мкс и напряжением полувыборки 30 В. Большие размеры монокристаллов с высоким оптическим качеством могут быть

получены для молибдата гадолия $Gd_2(MoO_4)_3$, однако время переключения в нем составляет 0,1—1 мс, т. е. значительно больше, чем в титанате висмута.

Можно ожидать, что быстродействующие ПВМС, матрично адресуемые электрическим напряжением, будут созданы на основе ферромагнитных материалов. Истинный порог переключения в них гарантирует возможность создания устройств размером более 100×100 разрешимых элементов. Имеются сообщения о разработке на ортоферритах типа D_1FeO_3 , $YFeO_3$, $YFe_{1-x}Gd_xO_3$ управляемых транспарантов со следующими параметрами: объем 100×100 элементов, максимальный контраст 400:1, оптическая эффективность — более 15% для красной линии гелий-неонового лазера. Запись производится локальными магнитными полями, создаваемыми с помощью токовых петель. В этом случае для записи 1 бит информации требуется время 10^{-8} с при токе не более 1 А и диаметре токовой петли 100—300 мкм. Стирание и перезапись информации могут производиться неограниченное число раз, время памяти также не лимитируется.

Трудности, связанные со значительным поглощением ферромагнетиков в видимой области спектра и еще большими токами перемагничивания, по-видимому, будут преодолены с использованием новых материалов и полупроводниковых инжекционных лазеров.

Возможно создание ПВМС на многоканальных акустических модуляторах. Дифракция света на акустической волне, возбуждаемой с помощью пьезопреобразователей, применяется для модуляции и отклонения светового луча. Формирование двумерного массива данных возможно с помощью большого числа индивидуально адресуемых ячеек, число которых соответствует числу каналов модуляции. Временная последовательность m электрических импульсов по n каналам преобразуется в модуляторе света в бегущее изображение с числом элементов $m \times n$. Для параллельного считывания двумерного массива информации длительность импульса считывающего луча должна быть достаточно мала — порядка десятков наносекунд, чтобы группу последовательно возбужденных акустических сигналов с одной несущей частотой можно было бы считать неподвижной дифракционной решеткой. Разработан амплитудный пространственный модулятор со следующими параметрами: число каналов $n=34$, число элементов в каждом канале $m=$

Основные характеристики некоторых электрически управляемых ПВМС

Характеристики	Сегнетокерамические ЭУТ	Аксестооптические ЭУТ	Магнитооптические ЭУТ
Модулирующая среда	ЦТСЛ 7/65/35, зерно 2 мкм	ЦТСЛ 9/65/35, зерно 2 мкм	Ортоферрит ит- трия
Модулирующий эффект	Изменение двулучепреломления	Изменение двулучепреломления	Эффект Фарадея
Адресование	Матричное	Индивидуальное	Магрич:се
Рабочая апертура, см	3,2×3,2	3,0×0,5	2×2
Напряжение питания, В	100—200	300	ток 1А
Полное разрешение	128×120	128×1	100×100
Время переключения элемента, с	—	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
Время формирования массива, с	—	10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁶
Память	Долговременная	Нет	Долговременная
Максимальный контраст	10:1	100:1	350:1
Срок службы	До 10 ⁷ —10 ¹⁰ циклов	10 ¹¹	Не ограничен
		Изменение показателя преломления	Изменение показателя преломления
		Индивидуальное	Индивидуальное
		3,4×2,2	8,6×75
		—	—
		34×128	100
		5·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
		5·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
		Нет	Нет
		—	30:1
		Не ограничен	Не ограничен

≈ 128 , потребляемая мощность около 0,5 Вт на один канал, длина элементарного акустического луча 0,127 мм при апертуре модулятора $33,6 \times 21,7$ мм². Производительность модулятора оценивается в 1 Гбит/с. Многоканальные акустические модуляторы требуют применения импульсных источников большой мощности, так как акустическую картину можно считать неподвижной лишь за время порядка нескольких наносекунд.

В табл. 12 представлены основные характеристики некоторых электрически управляемых ПВМС. Электрически управляемые транспаранты осуществляют ввод в оптический канал обработки информации, поступающей от электронной памяти ЭВМ в виде электрических сигналов. Их главная задача — быстрое формирование массивов в оптическом виде, т. е. подготовка информации к параллельным оптическим системам. Тем самым они являются устройствами, связывающими электронный и оптический каналы вычислительной системы. По ранее приведенным оценкам их пропускная способность может достигать 10^{12} бит/с и выше, но реальная пропускная способность созданных ЭУТ соответствует 10^9 бит/с. Устройства ввода информации, основанные на линейках модуляторов без памяти с индивидуальным адресованием, обладают хорошим быстродействием и могут быть адресованы за один такт, так что линейка из 100 элементов может обеспечить пропускную способность 10^9 — 10^{10} бит/с.

Оптически управляемые цифровые транспаранты. В наибольшей степени разработаны оптически управляемые ПВМС для аналоговой когерентной оптической обработки информации в реальном масштабе времени. Существует большой выбор материалов для оптически управляемых ПВМС. Требования, предъявляемые к ОУТ, в большой степени зависят от конкретного применения, и, по-видимому, ни одна из предложенных конструкций ОУТ не является универсальной. Оптически управляемые цифровые транспаранты предназначены для обработки двумерных массивов цифровой информации в виде двоичных изображений, таблиц и т. п. и должны за один такт преобразовывать падающие на него потоки информации.

Цифровой оптически управляемый транспарант является фундаментальным логическим элементом оптической вычислительной техники. Он выполняет две функции: логическое преобразование оптических изображе-

ний и восстановление до стандартного уровня световой энергии результирующего изображения за счет источника питания. Выполнение этих функций имеет принципиальное значение, поскольку всякое дискретное преобразование изображений связано со значительными световыми потерями. Отсутствие таких элементов существенно ограничивает возможности построения оптических процессоров, ибо без усиления интенсивности изображения до стандартного уровня можно строить системы лишь с небольшим числом каскадов обработки (двумя-тремя) и невозможна организация вычислений с трактом обратной связи, предусматривающим подачу результата вычислений с выхода процессора в память и снова на его вход.

Один из наиболее известных способов построения ОУТ основан на использовании многослойной структуры фотопроводник — электрооптический материал. Схема построения ОУТ приведена на рис. 10. Оптически управляемый транспарант состоит из слоев фотопроводника, электрооптического материала и оптического разделительного слоя. С обеих сторон структуры нанесены прозрачные электроды, с помощью которых на транспарант подается управляющее напряжение. Оптический разделительный слой выполняется в виде матрицы зеркально отражающих металлических ячеек, разделенных непрозрачным резистивным слоем. Наряду с поглощающим слоем между отражающими ячейками можно применять маску, наносимую на поверхность прозрачного электрода, который исключает попадание света между зеркаль-

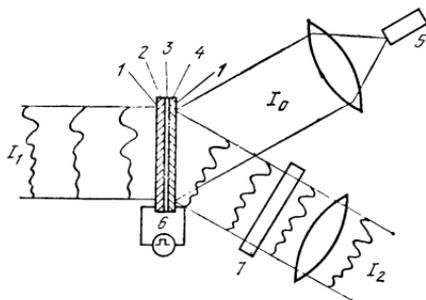


Рис. 10. Схема построения оптически управляемого транспаранта с однородным модулирующим слоем:

I_0 — считывающая волна; I_1 — управляющая волна входного изображения; I_2 — отраженная волна с выходным изображением; 1 — прозрачные электроды; 2 — слой фотопроводника; 3 — оптический разделительный слой; 4 — электрооптический светомодулирующий слой; 5 — источник считывающей волны; 6 — генератор импульсов напряжения; 7 — поляризационный анализатор

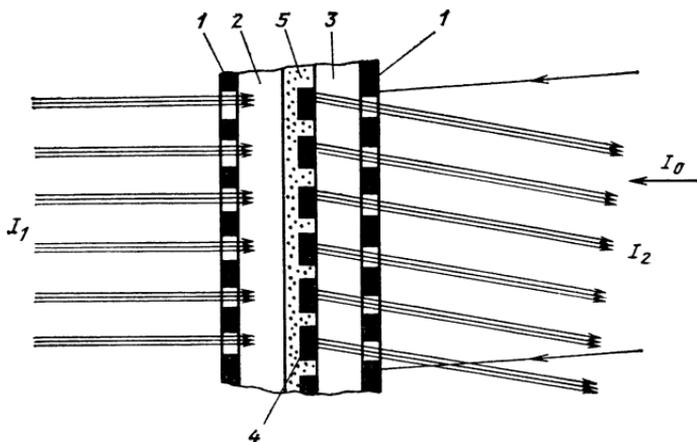


Рис. 11. Структура оптически управляемого транспаранта отражательного типа с оптическим разделительным слоем:

I_0 — считывающая волна; I_1 — управляющая волна входного изображения; I_2 — отраженная волна с выходным изображением; 1 — маскирующие электроды с прозрачными окнами; 2 — фотопроводник; 3 — электрооптический материал; 4 — зеркала; 5 — поглощающий резистивный слой

но-отражающими ячейками (рис. 11). Диэлектрическое зеркало и поглощающие слои позволяют значительно уменьшить влияния считывающего излучения на возбуждение фотопроводника и одновременно становится возможным производить запись и считывание информации излучением с одинаковой длины волны.

Каждая ячейка управляемого транспаранта действует по принципу делителя напряжения, в одном из плеч которого стоит фотосопротивление. При освещении управляющей волной происходит перераспределение напряжения, приложенного к структуре. В результате считывающая волна, отраженная от транспаранта и дважды прошедшая через слой электрооптического материала, в освещенных ячейках претерпевает амплитудную или фазовую модуляцию. После прекращения импульса напряжения структура релаксирует к исходному состоянию. При планарной конструкции ОУТ для модуляции отраженной волны могут применяться, например, такие эффекты, как продольный эффект Поккельса на диэлектрических кристаллах типа АДП, КДП и перовскитах, электропоглощение вследствие действия эффекта Франца-Келдыша в широкозонных полупроводниках типа GaAs, CdS, GaP, динамическое рассеяние в жидких кристаллах под действием электрического поля и т. д.

Оптически управляемые транспаранты с однородным фоточувствительным слоем наиболее полно изучены и больше всего распространены в настоящее время. Несмотря на то, что их характеристики (чувствительность, быстродействие, контраст картины) постепенно улучшаются, тем не менее использование ОУТ подобного типа в качестве основного элемента в универсальной оптической цифровой вычислительной технике является проблематичным. Во-первых, для реализации памяти в таких структурах в качестве светомодулирующей среды используются обычно электрооптические материалы типа сегнетоэлектриков, имеющие значительную остаточную поляризацию. Это значит, что при прохождении цикла записи — стирания в слое электрооптического материала выделяется значительное количество энергии переполаризации 10^{-4} Дж/см² и больше при толщине материала 50 мкм. Для построения же транспаранта с быстродействием 10^{-6} с и выше при нормальном теплоотводе 1 Вт/см² допустимое значение энергии составляет 10^{-6} Дж/см². Во-вторых, транспаранты с однородным фотослоем обладают ограниченным быстродействием и тактовые частоты в случае их применения в оптических процессорах не превышают 10^4 — 10^5 Гц. Причиной этого является, в основном, невозможность получения высокого усиления фототока в однородном фоточувствительном слое.

Цифровые оптически управляемые транспаранты, состоящие из фотоприемников, элементов транзисторного управления и светового клапана, были предложены в 1972 г. Г. Тейлором и В. Косоноки.

Схема построения одного элемента представлена на рис. 12. Структура состоит из ячейки кремниевой управляющей интегральной матрицы, соединенной со слоем электрооптического материала с помощью зеркальной металлической контактной площадки. Интегральная матрица изготавливается на стеклянной подложке, прозрачной для управляющего света. Эквивалентная электрическая схема ячейки показана на рис. 13. Электрооптический слой, покрытый прозрачным электродом, является общим для всех ячеек. Управляющая электрическая часть ячейки транспаранта состоит из ключа на транзисторе $VT1$, через который производится заряд и разряд емкости модулирующего слоя C_0 . Состояние ключа $VT1$ определяется фототиристором на транзисторах $VT2$ и $VT3$. Устройство работает следующим образом. Для соз-

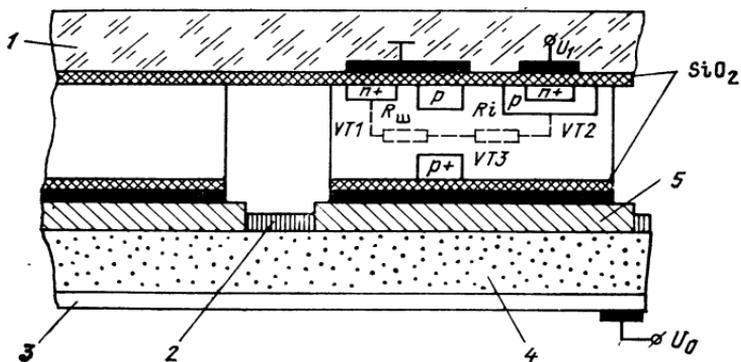


Рис. 12. Схема построения цифрового оптически управляемого транспаранта типа «латрица»:

1 — стекло; 2 — непрозрачный диэлектрик; 3 — прозрачный электрод; 4 — электрооптический материал; 5 — металл

дания напряжения на слое электрооптического материала ключ $VT1$ отпирается электрическим импульсом, поступающим на его базу с тиристора, управляемого на этом этапе электрическими сигналами. На прозрачный электрод подается положительный импульс напряжения с амплитудой U_0 . Протекающий ток заряжает емкость модулирующего слоя. Затем ключ запирается, а импульс питающего напряжения снимается. Теперь напряжение U_0 распределяется между емкостью C_0 и емкостью обратно смещенного $p-n$ перехода транзистора $VT1$, причем на модулирующем слое оказывается напряжение, составляющее $0,8-0,9 U_0$. Однако заряд на C_0 сохранится лишь в неосвещенных ячейках матрицы. Если же на ячейку поступит управляющий световой импульс I_1 ,

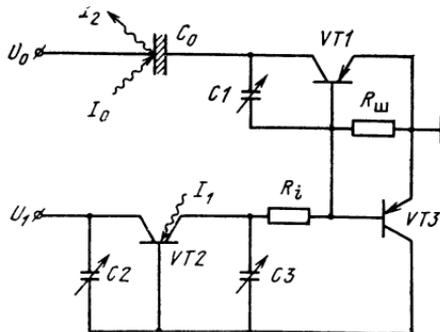


Рис. 13. Эквивалентная электрическая схема цифрового транспаранта с внутренней электронной логикой:

I_1 — управляющая волна входного изображения; I_0 — считывающая волна; I_2 — выходное изображение

то фототиристор откроет ключ $VT1$, через который разрядится емкость C_0 . Результатом записи является поляризованная модуляция считывающего света за счет электрооптического эффекта в слое электрооптического материала.

Такой способ управления напряжением в корне отличается от управления в структурах с однородным фотослоем, работа которых эквивалентна работе RC -делителя. В данном случае структура работает как емкостный делитель, что дает преимущество по быстродействию и энергетике. Дополнительное достоинство заключается в возможности сохранять в ячейке записанную информацию в течение времени утечки заряда через закрытый p - n переход, т. е. 10^{-2} с или 10^3 — 10^4 тактовых периодов. В каждом такте необходимо компенсировать снижение напряжения на электрооптическом материале лишь на 10^{-3} — $10^{-4} U_0$. Необходимость восстанавливать только часть напряжения увеличивает экономичность транспаранта. Такой динамический режим хранения в отличие от обычного статического дает возможность применить в транспаранте электрооптический материал, не обладающий гистерезисными свойствами, т. е. сегнетоэлектрик при температуре выше точки Кюри. В результате плотность энергии, рассеиваемой в цикле запись — стирание, снижается до уровня 10^{-7} Дж/см². Управляемое напряжение на модуляторе определяется пробоем p - n перехода транзистора $VT1$ и может составлять около 100 В.

Универсальный транспарант описываемого типа предположительно будет обладать следующими характеристиками: тактовая частота 1—10 МГц; число ячеек 10^3 — 10^4 ; усиление яркости, т. е. отношение мощности в единичном элементе на выходе транспаранта к такой же мощности на входе транспаранта, 30; чувствительность 10^{-13} — 10^{-14} Дж/элемент, что обеспечивается высоким внутренним усилением фототока. Цифровой оптически управляемый транспарант, обладающий такими либо более высокими характеристиками, является основным элементом для оптической цифровой вычислительной техники.

Материалы для ячеек оптической памяти. Оптические способы хранения информации дают возможность получать высокую плотность записи информации и малое время выборки данных из произвольной ячейки памяти. Это обстоятельство в сочетании со способностью произ-

водить параллельную выборку и ввод двумерных массивов информации в оптическое арифметическое устройство объясняет большой интерес, проявляемый к оптической памяти.

Материалы, применяемые для устройств оптической памяти, должны удовлетворять ряду требований, как общим, предъявляемым к любому вычислительному устройству, так и специфичным для оптической записи информации. С точки зрения вычислительной техники материалы для оптической записи должны устойчиво сохранять свои свойства в течение продолжительного интервала времени — нескольких лет при нормальных условиях. Условия работоспособности материала не должны включать охлаждение до криогенных температур и необходимость вакуумирования. В зависимости от типа памяти материалы для устройств памяти должны обладать определенной степенью реверсивности. Для ячеек памяти, в которых хранятся постоянные числа, команды, инструкции, необходимо лишь однажды записать информацию, в то время как для ячеек оперативной памяти число циклов записи — стирания должно быть чрезвычайно большим, при этом оптические свойства среды не должны меняться.

Оптический характер записи информации предъявляет следующие требования: малое значение энергии записи, высокая чувствительность к излучению таких распространённых лазеров, как гелий-неоновый, аргоновый, гелий-кадмиевый, инжекционный на арсениде галлия, а также высокая разрешающая способность материала. Наиболее распространёнными и разработанными материалами для постоянной оптической памяти являются фотографические пластинки и пленки. Они сочетают высокую разрешающую способность (более 2000 лин/мм) и чувствительность 10^{-5} — 10^{-4} Дж/см².

Дихромированный желатин $(\text{NH}_4)_2\text{C}_8\text{H}_2\text{O}_7$, $\text{K}_2\text{C}_8\text{H}_2\text{O}_7$ используется для получения высококачественных голограмм. Оптические свойства голограмм, зарегистрированных на слоях дихромированного желатина, близки к идеальным. На этом материале могут быть записаны как отражательные, так и пропускающие голограммы, причем высокая дифракционная эффективность сочетается с низким уровнем шума. Чувствительность материала 10^{-3} Дж/см² и разрешающая способность 4000 лин/мм.

Существует ряд физических эффектов и явлений, который может использоваться для оперативной записи

информации, например, термомагнитная и тепловая запись, фотоиндуцированные процессы. При термомагнитной записи лазерное излучение используется для нагревания материала до температуры, при которой может произойти его перемагничивание. Считывание идет за счет магнитооптических эффектов Керра и Фарадея. Исследованы такие материалы, как $MnBi$, EuO , $GdIG$, $YIG:Gd$, $MnAs$ и др. Ведутся исследования по реверсивной оптической записи информации на пленках аморфных полупроводников самых различных составов. Например, для сплавов $Ge_{15}Te_{85}$ характерен фазовый переход в кристаллическое состояние при нагревании. Фазовый переход сопровождается изменением оптических характеристик пленок. Требуемая энергия светового импульса близка к энергии, необходимой при записи на $MnBi$, т. е. 10^{-2} Дж/см².

Оксиды ванадия при некоторых температурах претерпевают фазовый переход из состояния с низкой проводимостью в состояние с очень высокой — металлической проводимостью. Фазовый переход двуоксида ванадия VO_2 происходит при температуре около 70 °С. Состояния с низкой и высокой проводимостью различаются изменениями коэффициента отражения и пропускания.

При фотоиндуцированных процессах среда непосредственно взаимодействует с фотонами. Фотохромные материалы изменяют свой спектр поглощения при облучении коротковолновым излучением, в результате чего изменяется их пропускающая способность на длине волны считывания. Записанная таким образом информация может быть стерта при освещении инфракрасным излучением или нагревании. Фотохромные материалы имеют высокую разрешающую способность (более 3000 лин/мм), не требуют процессов проявления или фиксирования. Информация в них может храниться в виде большого числа голограмм, записанных под разными углами. В то же время фотохромные материалы обладают низкой чувствительностью 10^{-1} — 10^{-2} Дж/см², требуется две длины волны при записи и стирании информации, малая дифракционная эффективность записанных голограмм и низка их температурная стабильность.

При освещении некоторых сегнетоэлектрических кристаллов интенсивным световым полем показатель преломления в освещенной области изменяется. Этот эффект обнаружен в кристаллах $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, $BaTiO_3$,

$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, BaCaNaNbO_3 и др. Этот эффект может быть использован для голографической записи информации. Кристаллы позволяют производить стирание информации нагреванием или засветкой. Достоинством сегнетоэлектрических кристаллов является высокая разрешающая способность (более 4000 лин/мм), высокая дифракционная эффективность. Кроме того, после множества циклов записи — стирания не наблюдается эффект «усталости». Недостатком этих кристаллов является довольно высокая энергия записи 10^{-1} — 10^{-2} Дж/см².

Исходя из того, что материалы для ячеек реверсивной оптической памяти для записи 1 бит информации должны обладать чувствительностью 10^{-11} — 10^{-12} Дж, т. е. их чувствительность должна быть выше 10^{-5} — 10^{-6} Дж/см², а время цикла записи и стирания лежать в диапазоне одной или нескольких микросекунд, можно прийти к выводу, что ни один из существующих или разрабатываемых в настоящее время материалов не обладает всеми необходимыми свойствами для того, чтобы служить в качестве основы для построения оптической оперативной памяти с параллельной записью массивов информации емкостью 10^3 — 10^4 бит.

Из-за отсутствия подходящих реверсивных сред функции оперативного запоминания массивов информации в оптоэлектронном процессоре может выполнять универсальный оптический цифровой транспарант типа «латрица». От описанного выше транспаранта он отличается наличием двух равноценных управляющих транзисторов *VT2* вместо одного. Оба эмиттера транзисторов могут быть соединены с аналогичными эмиттерами других транзисторов разводящими шинами, образующими ортогональные адресуемые электроды. В этом случае имеется возможность использовать устройство не только как оптически и электрически управляемый транспарант, но и как запоминающее устройство с выборочной записью или стиранием информации.

Оптические элементы. Помимо логических преобразований важную роль в оптической вычислительной технике играют оптические преобразования изображений числовых картин. Эти преобразования возникают при передаче числовых картин от одного транспаранта к другому и выполняют функции коммутации различных оптических каналов. В отличие от логических преобразований оптические преобразования не требуют машинного времени, так как время распространения света через оп-

тические преобразователи значительно меньше времени срабатывания цифровых транспарантов.

Ряд простых преобразований над числовыми картинками можно выполнить с помощью обычной, цилиндрической или растровой оптики. Например, логическое суммирование элементов строк или столбцов осуществляется с помощью цилиндрической линзы. Операция мультипликации числового столбца или строки осуществляется цилиндрическим линзовым растром. Операция транспонирования, т. е. замена строк столбцами, может быть выполнена также с помощью цилиндрического растра, у которого оси цилиндрических линз расположены вдоль главных диагоналей числовых ячеек.

Широкие возможности для преобразования оптических картин представляет волоконная оптика. Например, операции совмещения или разветвления числовой картины могут быть выполнены с помощью устройства, показанного на рис. 14. С помощью волоконно-оптических элементов могут осуществляться также операции

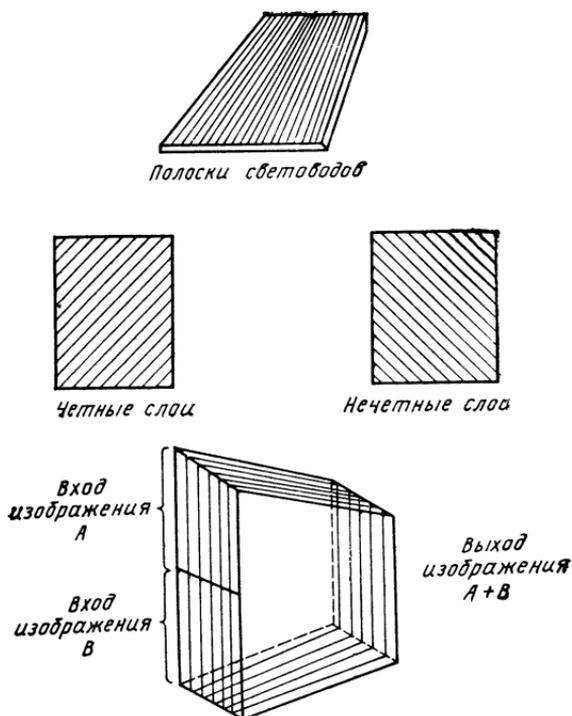


Рис. 14. Устройство совмещения двух картин, выполненное на основе волоконной оптики

транспонирования, сдвига числовой картины и др. Таким образом, оптические преобразования над числовыми картинками выполняются с помощью элементов, традиционных для оптической промышленности, и поэтому их создание не встречает особых технологических трудностей.

4. Развитие элементной базы оптоэлектронных процессоров методами интегральной оптики

Многопозиционные дефлекторы и цифровые ПВМС являются важными компонентами при реализации оптоэлектронных процессоров. Для высокопроизводительных процессоров важно иметь эффективные и высокоскоростные модуляторы и дефлекторы света. Без таких элементов нельзя создать системы, превосходящие по производительности электронные ЭВМ.

В предыдущем параграфе рассматривались способы реализации ПВМС и дефлекторов на основе электрооптических, акустооптических и магнитооптических эффектов в объемных средах. Вышеперечисленные эффекты, используемые для модуляции и переключения света, являются относительно слабыми и поэтому в объемных устройствах необходимо создавать сильные электрические, магнитные или акустические поля. Следовательно, по необходимости должна запастись большая энергия поля, а потребляемая и рассеиваемая в тепло мощность пропорциональна запасенной энергии. Отсюда следует вывод о необходимости разработки технологии, которая позволила бы создавать ПВМС и дефлекторы света с минимальной потребляемой мощностью.

Разработка приборов управления лазерным излучением, отличающихся малыми размерами, а также невысокими управляющими напряжениями и малой потребляемой энергией, связана с развитием интегральной оптики.

Основой волноводных оптических модуляторов и других устройств интегральной оптики являются пленочные оптические волноводы. Их свойства и методы создания подробно описаны и сводятся к следующему.

Оптический волновод представляет собой тонкую пленку толщиной h с показателем преломления n_1 , созданную на поверхности подложки (рис. 15). С другой стороны находится покровный слой (или воздух). Показатели преломления подложки n_2 и покрытия n_3 меньше

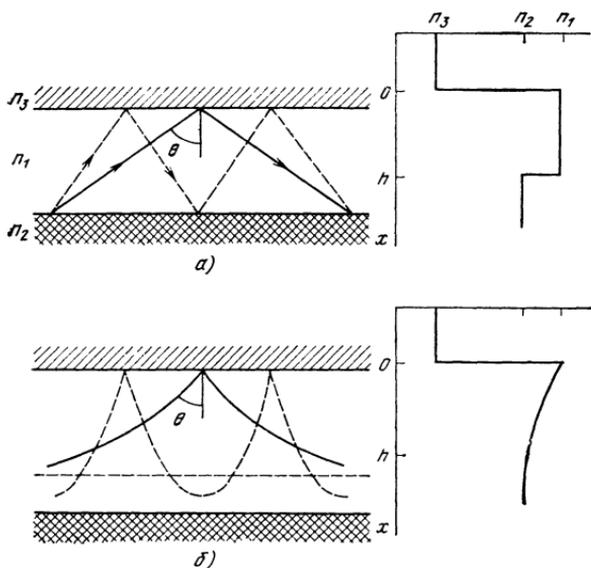


Рис. 15. Распределение показателя преломления и распространение излучения в оптических волноводах:

а — скачкообразные изменения показателя преломления; *б* — непрерывное изменение показателя преломления (сплошные линии относятся к низшим, а штриховые — к высшим волноводным модам)

показателя преломления пленки $n_1 > n_2 \geq n_3$. Изменение показателя преломления в волноводе может быть скачкообразным или иметь градиент, как показано на рис. 15. В любом случае выполнение условия $n_1 > n_2 \geq n_3$ обеспечивает для излучения в пленке волноводное распространение благодаря полному внутреннему отражению от границ раздела. Требуемые для этого разности показателей преломления составляют 10^{-3} — 10^{-2} .

Физическая суть волноводного распространения света состоит в том, что свет в пленке идет по зигзагообразному пути. Амплитуда поля в направлении распространения вдоль пленки z определяется выражением вида $\exp(-j\beta z)$, в котором постоянная распространения β связана с углом Θ соотношением $\beta = \kappa n_1 \sin \Theta$, где $\kappa = 2\pi/\lambda$ — волновое число. В волноводе могут распространяться ТЕ- и ТМ-моды, поляризованные соответственно параллельно или перпендикулярно плоскости пленки. Число направляемых мод дискретно и растет с увеличением толщины волновода h . Кроме направляемых мод в волноводной структуре могут иметь место моды, угол

падения которых на поверхность раздела меньше угла полного внутреннего отражения. Такие моды выходят из волновода в сторону подложки или покрытия и называются излучательными модами.

Типичная толщина оптического волновода составляет несколько микрон, поэтому для ввода в него излучения разработаны специальные вводные устройства. На рис. 16 показаны два типа таких устройств. В первом случае (рис. 16,а) призма с большим показателем преломления $n_p > n_1$ установлена достаточно близко к поверхности пленочного волновода, обычно это расстояние около 1000 \AA , так что она может взаимодействовать с полем волноводной моды. Для эффективного ввода излучения необходимо выполнить условие фазового согласования, т. е. $\beta = k n_p \sin \Theta_p$, где Θ_p — угол ввода в призму относительно нормали к пленке.

Для решеточного вводного устройства (рис. 16,б) в волноводе создается периодическая структура, например дифракционная решетка. Общие характеристики призмного и решеточного вводных устройств достаточно подобны. Для однородной связи, т. е. при постоянном зазоре между пленкой и призмой или неизменном шаге решетки максимальная теоретическая эффективность ввода составляет около 80% для пучка света с однородным или гауссовым сечением. Эффективность ввода может достигать почти 100%, когда зазор между призмой и пленкой сужается для согласования вводного пучка и поля, выходящего из волновода, а также если соответственно рассчитать толщину и форму профиля решетки. Оптические волноводы могут создаваться на поверхности подложки путем ее травления, ионной имплантации

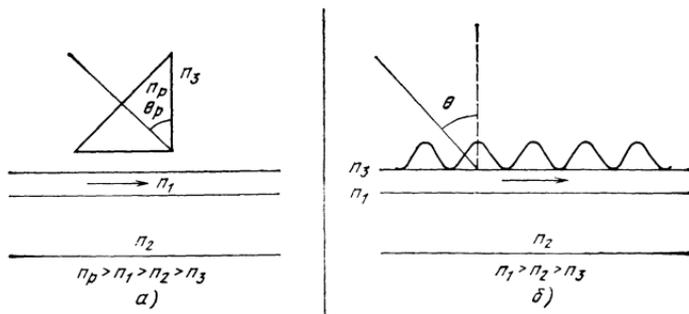


Рис. 16. Вводные устройства:

а — призмный элемент связи; б — ввод излучения в тонкопленочный волновод с помощью решетки

и других способов, а также осаждением на ее поверхности пленок других веществ.

В настоящее время наиболее распространенным материалом для электрооптических и акустооптических модуляторов является ниобат и танталат лития. В этом материале создается волноводный слой с градиентом показателя преломления. Он может создаваться при нагреве кристалла до температуры 900°C . При этом Li_2O диффундирует из кристалла («обратная диффузия») и поверхностный слой обедняется литием, что приводит к увеличению в нем необыкновенного показателя преломления. Другой метод заключается в том, что на поверхность кристалла напыляют слой металла, чаще всего титана. При нагреве до температуры 950°C металл диффундирует в кристалл, вызывая изменение обоих показателей преломления. Такой метод достаточно близок к планарной технологии микроэлектроники и позволяет формировать разнообразные волноводные структуры.

Другим широко используемым материалом является арсенид галлия. Этот материал перспективен для создания интегрально-оптических структур управления лазерным излучением, поскольку на его основе могут создаваться пленочные лазеры, модуляторы, фотоприемники, электронные схемы управления, т. е. может осуществляться интеграция различных оптических компонент на одной подложке. Разрабатываются волноводы, изготавливаемые на кремниевой подложке по технологии, совместимой с технологией кремниевых интегральных схем (рис. 17).

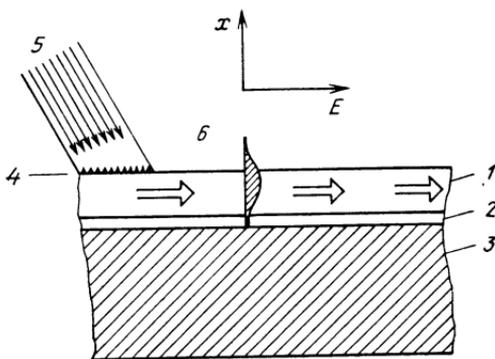


Рис. 17. Интегрально-оптический волновод на кремниевой подложке: 1 — прозрачный волноводный слой; 2 — слой SiO_2 ; 3 — кремниевая подложка; 4 — дифракционная решетка для ввода световой волны волновода; 5 — падающая световая волна; 6 — распределение амплитуды поля в волне, распространяющейся в волноводе

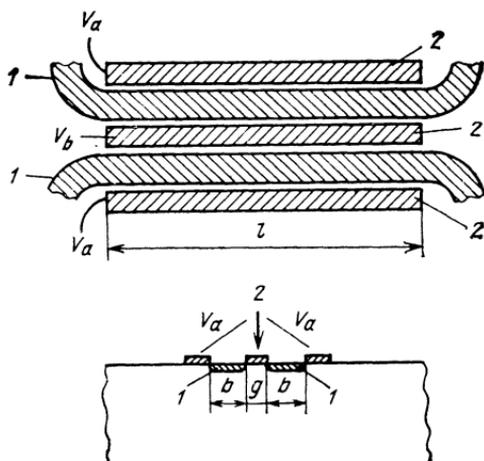


Рис. 18. Интегрально-оптический модулятор на связанных полосковых волноводах:

1 — волноводы, 2 — электроды (b — ширина волновода)

Среди большого числа интегрально-оптических модуляторов можно выделить переключатель на связанных полосковых волноводах. Схема этого электрооптического модулятора представлена на рис. 18. Два одинаковых полосковых волновода из электрооптических материалов нанесены на общую подложку. Оба волновода параллельны друг другу и разделены зазором g . Длина области, в которой они параллельны, равна l . Вне этой области расстояние между волноводами существенно больше g . Расположение электродов указано на рисунке. Если константы связи распространения в волноводах совпадают, т. е. $\beta_1 = \beta_2$ и волноводы одинаковы, то поток света из первого волновода будет перекачиваться во второй и наоборот при условии, что зазор g достаточно мал, так что затухающие поля обоих волнопроводов перекрываются. Если длина l очень велика и весь свет вначале был в первом волноводе, то после определенного расстояния вся световая поток перейдет во второй, а затем после прохождения такого же расстояния перейдет обратно в первый и т. д. Расстояние, на котором свет из одного волновода полностью перекачивается в другой при фазовом согласовании, называется критической длиной связи $L = \pi/2\kappa$, где κ — константа связи. В отсутствие напряжений $\beta_1 = \beta_2$ и если $L = l$, то весь свет перекачается из первого волновода во второй. При приложении поля фазовое согласование нарушается, т. е. $\beta_1 \neq \beta_2$,

и меняется количество света, перекачиваемого из одного волновода в другой. Если $(\beta_1 - \beta_2)^2 / 2\kappa \gg 1$, то передаваемая часть энергии резко падает.

Таким образом, если поле не приложено, свет, распространяющийся по одному волноводу, переходит в другой, если же поле существует, то свет остается в том же самом волноводе. Систему связанных волноводов можно рассматривать как элементарную логическую ячейку (рис. 19, а, б). Пусть U_0 — потенциал, при котором полностью отсутствует перекачка из одного волновода в другой, а излучение вводится в первой волновод и регистрируется также на выходе первого волновода. Тогда если потенциалы на двух сигнальных электродах U_a и U_b равны нулю или $U_a = U_b = U_0$, то света на выходе первого волновода не будет, если же $U_a = 0, U_b = U_0$, или $U_a = U_0, U_b = 0$, то свет остается в первоначально возбужденном волноводе, т. е. реализуется функция сложения $a \oplus b$ по модулю 2, выход же второго волновода реализует функцию $\overline{a \oplus b}$.

Для ниобата лития при $g = 2$ мкм 100%-ное выключение происходит при $U = 2$ В, а критическая длина связи $L = 4$ мм. Для $g = 2$ мкм, $L = 4$ мм потребляемая мощность приблизительно равна $2 \cdot 10^{-5}$ Вт/МГц. При переключении с частотой 10 МГц потребляемая мощность на

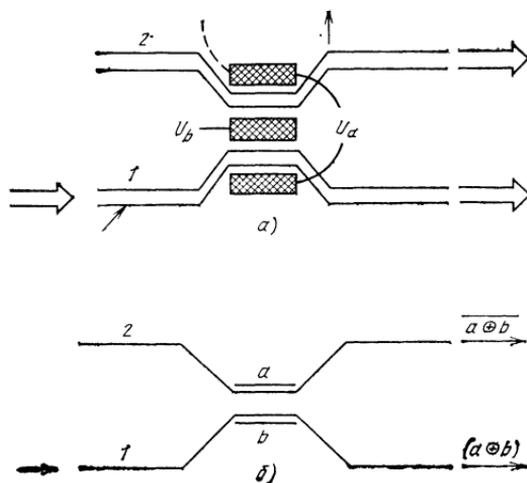


Рис. 19. Интегрально-оптический переключатель на основе связанных волноводов:

1 — волновод, в который вводится излучение; 2 — пассивный волновод, на выходе которого может появиться излучение

один элемент составляет $2 \cdot 10^{-4}$ Вт, а энергия переключения приблизительно 20 пДж.

Этот пример показывает, что на основе связанных волноводов могут быть созданы электрооптические переключающие устройства с оптимальными характеристиками. Для сравнения укажем, что современные высокоскоростные ECL- и TTL-электронные логические схемы требуют энергии переключения в диапазоне 50—100 пДж.

Из вышеприведенного рассмотрения становится ясным, что для оптоэлектронных процессоров на основе интегрально-оптических структур могут быть созданы линейные и матричные ПВМС, а также многопозиционные дефлекторы с оптимальными параметрами.

На рис. 20 представлена схема линейного ПВМС на основе связанных волноводов. Линейные модуляторы с числом элементов 32, 64, 128 выполняют функции ввода многоразрядных чисел из оперативной электронной памяти в оптоэлектронный процессор. Достоинством линейного модулятора на связанных полосковых волноводах является то, что вводимые числа автоматически представлены в парафазном коде.

В оптоэлектронном процессоре обработка информации производится на ПВМС с оптическим входом и выходом. Применение интегральной оптики для построения оптически управляемых транспарантов позволяет значительно поднять их быстродействие, снизить рассеиваемую мощность и уменьшить габариты. Одновременно существенно облегчается технологическая реализация уп-

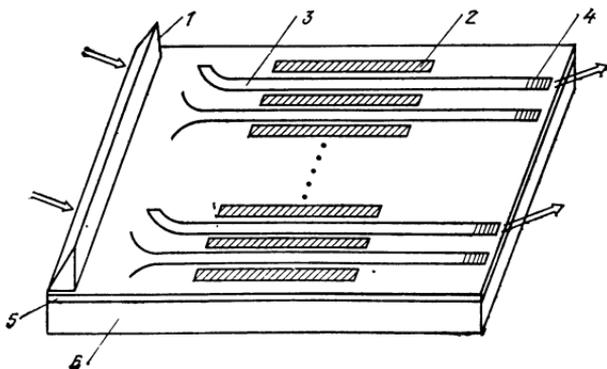


Рис. 20. Многоэлементный линейный ПВМС на основе связанных волноводов:

1 — призматический элемент ввода; 2 — электроды; 3 — полосковые волноводы; 4 — дифракционная решетка для вывода излучения; 5 — тонкопленочный волновод; 6 — подложка

равляемых транспарантов на оптических интегральных схемах.

Функциональная схема строки управляемого транспаранта на интегрально-оптической основе представлена на рис. 21. Управляющие световые сигналы поступают на фотоприемники P ячеек строки, усиливаются электронными элементами, которые могут быть связаны между собой. Считывающее излучение от внешнего источника через волноводные ответвители попадает на оптические модуляторы и затем на элементы вывода излучения. Равномерное распределение считывающей световой мощности по элементам строки может быть достигнуто различными способами световой разводки. Типичные схемы волноводной разводки представлены на рис. 22, а, б. В первом варианте входная волна, введенная через дифракционную решетку в широкий (около 1 мм) волновод, разветвляется с помощью ряда планарных фоконов на отдельные одномодовые волноводы. Разводка осуществляется за счет поворотов световых каналов. Во втором варианте применяются частичные ответвители от

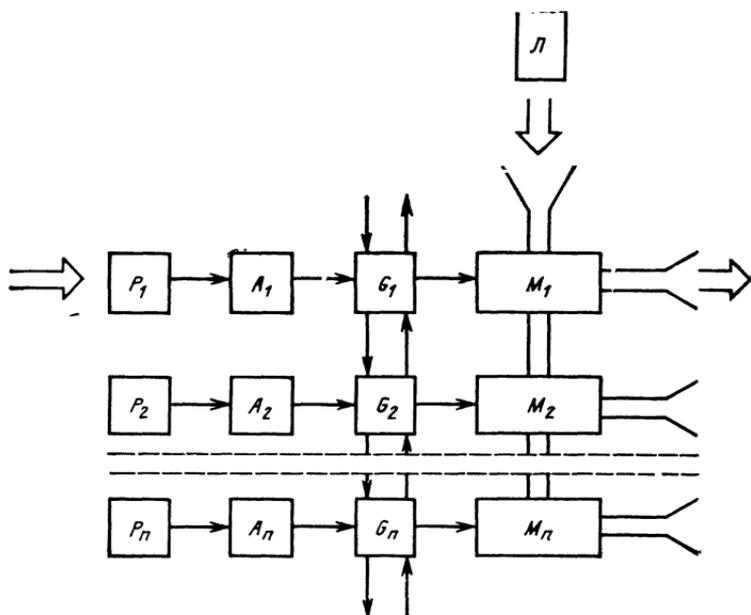


Рис. 21. Функциональная схема строки интегрально-оптического многоканального транспаранта:

P_i — фотоприемники; A_i — усилители; G_i — логические элементы; M_i — волноводные ответвители с модуляторами

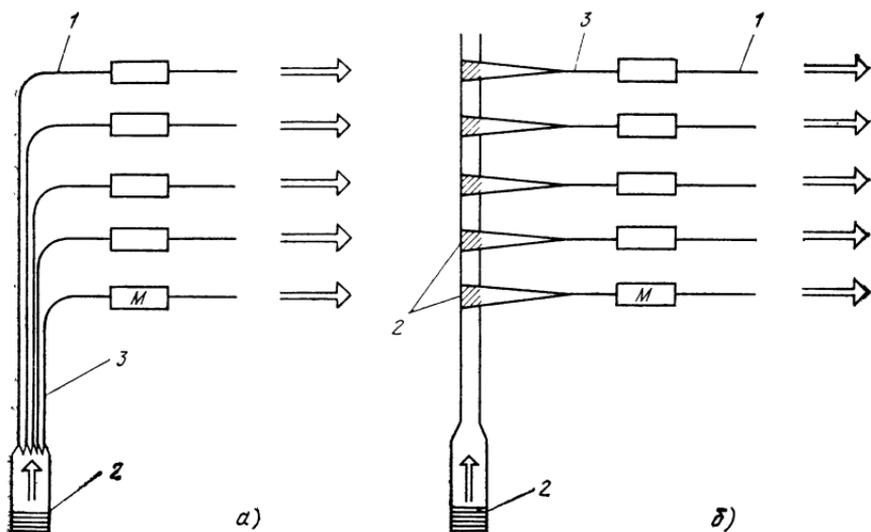


Рис. 22. Схемы волноводной разводки излучения:
а — с использованием фоконных разветвителей; *б* — с использованием дифракционных решеток;
 1 — полосковые волноводы; 2 — дифракционная решетка, 3 — планарный фо-
 кон; *М* — модулятор

планарного магистрального волновода, которые выполняются на брэгговских решетках и отражают световую волну под некоторым углом к магистрали. Эффективность решетки должна быть переменной вдоль магистрали для равномерного распределения световой мощности по элементам строки. Ответвленные волны через фоконные вводы поступают в волноводные каналы ячеек.

Конструкция двумерного транспаранта в целом определяется способом компоновки строк транспаранта в страницу. Интегральный вариант исполнения транспаранта предполагает размещение всех строк в одной плоскости подложки (рис. 23,а). С одной стороны этой подложки размещены фотодиоды, а с другой — интегрально-оптические волноводы с модуляторами. Считывающее излучение вводится в магистральный волновод, далее разветвляется в строчные волноводы и подается к отдельным ячейкам транспаранта. Возможен и другой вариант ввода излучения, когда каждая ячейка транспаранта снабжена собственным решетчатым вводом излучения (рис. 23,б). В таком варианте построения транспаранта становится возможным осуществление логиче-

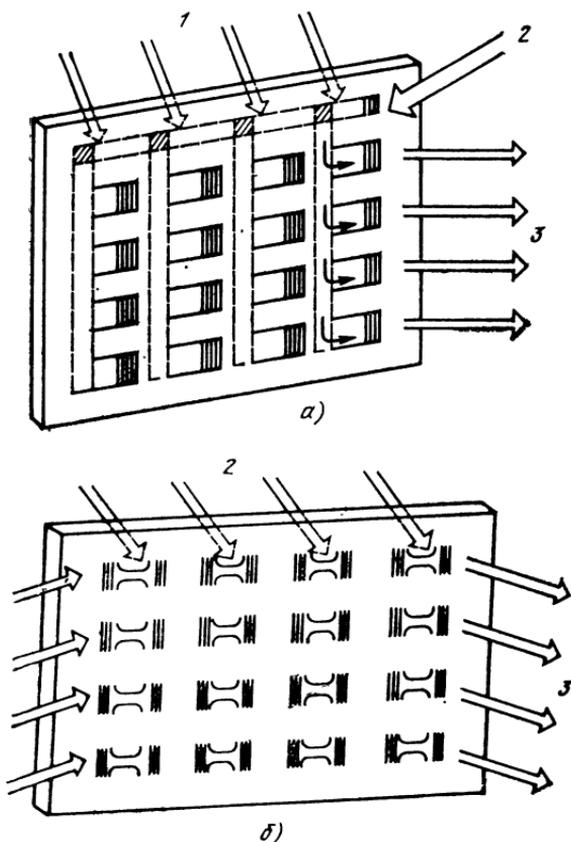


Рис. 23. Варианты построения двумерного интегрально-оптического транспаранта:

a — с общим вводом считывающего излучения (*1* — входное изображение; *2* — лазерный луч; *3* — выходное изображение); *б* — на связанных волноводах (*1* — операторные поля; *2* — входные переменные; *3* — выходные переменные)

ского взаимодействия двух картин, одна из которых подается со стороны фотоприемников, а другая — со стороны расположения интегрально-оптических волноводов.

В гибридном варианте двумерного транспаранта каждая строка находится на отдельной подложке, а страница формируется путем сборки страничных подложек в стопу. Каждая строка транспаранта содержит кремниевую интегральную микросхему и прозрачную плату с расположенной на ней оптической интегральной схемой. Оптическая интегральная схема содержит волноводные модуляторы, элементы ввода и вывода излу-

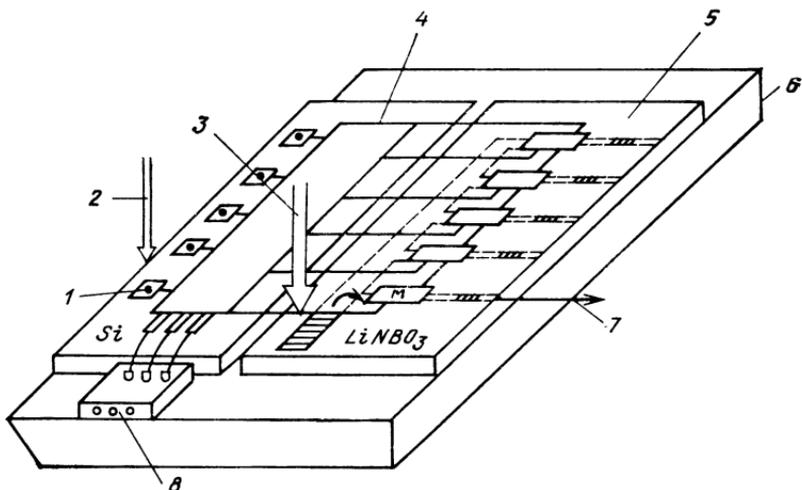


Рис. 24. Пример построения строки оптически управляемого цифрового транспаранта на интегрально-оптической основе по гибридной технологии:

1 — фотоприемник; 2 — входное изображение; 3 — излучение лазера; 4 — полупроводниковая схема управления; 5 — оптическая интегральная схема; 6 — плата; 7 — выходное изображение; 8 — электрический разъем

чения, а кремниевая интегральная микросхема — строку фотоприемников, усилителей и логических элементов. Один из примеров построения строки транспаранта, выполненный по гибридной технологии, представлен на рис. 24, а на рис. 25 представлен пример построения двумерного транспаранта, состоящего из набора строк. Вывод излучения из волноводов целесообразно осуществлять через торец с помощью дифракционной решетки, которая отклоняет излучение из волновода под малым углом в подложку (рис. 26). На этом же рисунке показан способ связи двух транспарантов, осуществляемый с помощью зеркальных поверхностей скошенных торцов подложки. В ряде случаев такая конструкция входных и выходных элементов позволяет подавать выходные изображения с одного транспаранта на вход другого без промежуточных оптических элементов.

Проведем оценку достижимых параметров интегрально-оптических транспарантов. Для получения высокого быстродействия важными параметрами являются энергия переключения элемента изображения и управляющее напряжение. Энергию переключения модулятора характеризует отношение управляющей мощности P к полосе

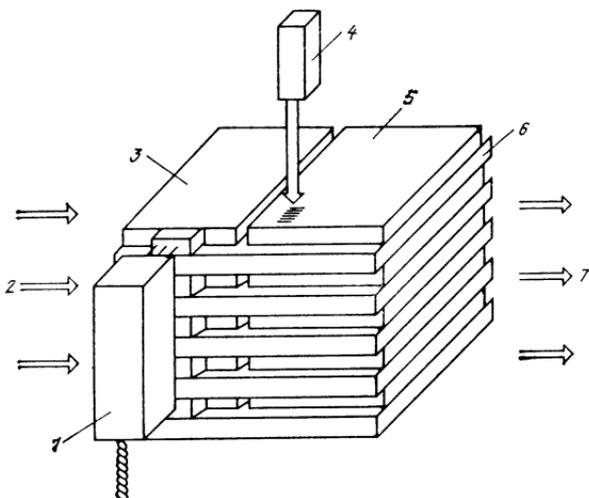


Рис. 25. Пример построения двумерного оптически управляемого транспаранта, состоящего из набора строк:

1 — электрический разъем; 2 — входное изображение; 3 — полупроводниковая схема управления; 4 — лазер; 5 — оптическая интегральная схема; 6 — прозрачная плата; 7 — выходное изображение

частот модуляции Δf при коэффициенте модуляции около единицы. Модуляторы на полосковых волноводах, изготовленные на арсениде галлия и ниобате лития имеют $P/\Delta f = 100$ мкВт/МГц, а при дальнейшем совершенствовании технологии это значение может быть доведено до 1 мкВт/МГц, т. е. 10^{-12} Дж на переключение одного элемента при управляющем напряжении не выше 10 В. Как по энергии переключения ($10^{-11} - 10^{-12}$ Дж), так и по управляющему напряжению (3—10 В) интегрально-оптические модуляторы совместимы с фотоприемными и логическими элементами кремниевых интегральных схем

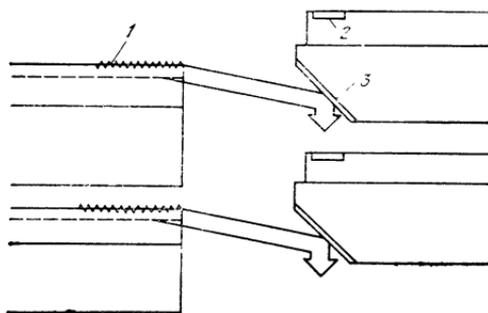


Рис. 26. Схема передачи изображения между транспарантами:

1 — дифракционная решетка; 2 — фотоприемник; 3 — зеркальная грань подложки

и, следовательно, могут работать при частотах в десятки или даже сотни мегагерц, т. е. с теми же тактовыми частотами, что и современные электронные вычислительные машины.

Производительность транспаранта при заданной мощности считывающего лазера $P_{\text{л}}$ и энергетической чувствительности фотоприемника $E_{\text{ф}}$ (Дж/бит) определяется выражением $Nf_{\text{T}}=10^{-0,1G}P_{\text{л}}/E_{\text{ф}}$, где N — число элементов изображения; f_{T} — тактовая частота; G — коэффициент усиления световой мощности, обеспечивающий компенсацию потерь на ввод, вывод и разветвление выходного сигнала — изображения. Приняв для способа вывода излучения, изображенного на рис. 23,б, потери на ввод и вывод из одной ячейки $G=10$ дБ, число элементов $N=64 \times 64$, чувствительность кремниевое фотоприемника с усилителем $E_{\text{ф}}=10^{-14}$ Дж, мощность считывающего лазера $P_{\text{л}}=20$ мВт, получим тактовую частоту транспаранта около 50 МГц. Производительность транспаранта при этом составляет 10^{11} бит/с, что близко к оценке (1) (см. § 2).

Интегрально-оптические методы могут оказаться эффективными при создании постоянной голографической памяти для хранения программ, инструкций, алгоритмов решения задачи и т. п. в виде двумерных бинарных картин. В связи с этим представляют интерес так называемые волноводные голограммы. Схема записи волноводных голограмм показана на рис. 27. Предварительно на тонкопленочный волновод наносят сверху тонкий слой светочувствительной среды. Опорный луч с помощью призмы вводится через подложку. С той же стороны подложки на светочувствительный слой падает Фурье-образ записываемого транспаранта. Если в качестве фоточувствительной среды используется As_2S_3 , то запись

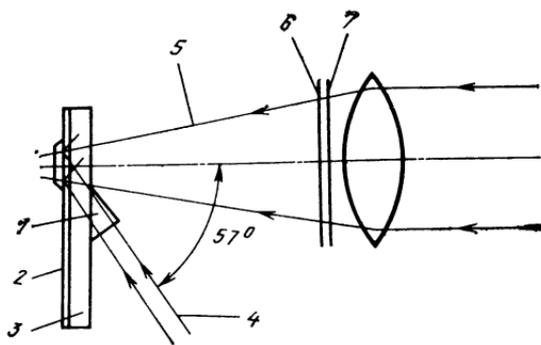


Рис. 27. Схема записи волноводных голограмм:

1 — призма; 2 — волновод; 3 — подложка; 4 — опорная волна; 5 — предметная волна; 6 — транспарант; 7 — диффузор

голограмм может производиться, например, линией 5145 Å аргонового лазера. Восстановление голограмм может осуществляться, например, длиной волны 6328 Å гелий-неонового лазера. Для безабберационного восстановления голограммы необходимо, чтобы постоянные распространения β опорной волны и восстанавливающей волны были согласованы. Экспериментально волноводные голограммы записывали на пленках As_2S_3 толщиной 300—800 Å, диаметр голограмм составлял 1 мм².

Замечательной особенностью волноводных голограмм является их высокая дифракционная эффективность. При восстановлении волноводной модой TE была получена полная дифракционная эффективность 92%, что совпадает с предсказанным теоретическим результатом.

На одной голограмме диаметром 1 мм² можно записать 10^3 — 10^4 бит, а на пластине размерами 5×5 см уместится около 1000 голограмм. Коммутация света от одной голограммы к другой может осуществляться, например, с помощью полосковых связанных волноводов или управляемых брэгговских решеток. Подобное оптическое запоминающее устройство будет выгодно отличаться от его аналога, построенного на объемных компонентах.

Методами интегральной оптики могут быть созданы высокоскоростные многопозиционные дефлекторы. Для отклонения луча может быть использовано, в частности, взаимодействие световой и акустических волн в тонкопленочных волноводных структурах. Если световой пучок диаметром D пересекается с акустическим пучком, ширина которого равна W , как это показано на рис. 28, то дифрагированный на акустической волне свет имеет максимум при выполнении условия Брэгга, т. е. $\sin \Theta = \frac{1}{2} \lambda f / v$, где $\Theta/2$ — угол падения света, измеренный относительно фронта акустической волны; $\lambda = \lambda_0 / n$ — длина волны падающего света в среде с показателем преломления n , а v и f — скорость и частота звука.

Коллимированный лазерный пучок можно отклонять в пределах угла $\Delta\Theta = 2n\Lambda/W$, где Λ — длина волны звука при изменении акустической частоты в пределах $\Delta f = 2n \frac{v}{\lambda_0} \frac{\Lambda}{W}$. Число позиций дефлектора определяется величиной $N_x = \tau \Delta f$, где $\tau = D/v$ — время, за которое акустическая волна проходит поперек лазерного пучка диаметром D .

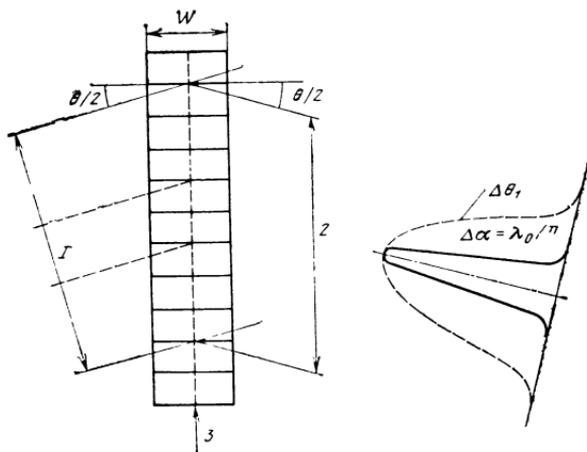


Рис. 28. Дифракция светового луча на акустической волне: 1 — падающий пучок, 2 — дифрагированный пучок, 3 — акустическая волна; $\theta/2$ — угол падения светового пучка, $\Delta\alpha$ — угловая ширина дифрагированного пучка, $\Delta\theta_s$ — диапазон сканирования светового луча

В качестве подложки широко используются кристаллы LiNbO_3 , поскольку ниобат лития обладает большими пьезоэлектрическими и электрооптическими постоянными. На подложках из LiNbO_3 изготавливают эффективные преобразователи встречно-штыревого типа для возбуждения акустических поверхностных волн с центральной частотой выше 1 ГГц и шириной полосы более 25%. Хорошими электрооптическими и акустооптическими свойствами обладают также эпитаксиальные пленки ZnO и ряд других материалов.

На основе тонкопленочных волноводов могут быть созданы акустооптические дефлекторы с разрешением более 1000 позиций. Для этой цели можно, например, использовать несколько преобразователей с разными центральными частотами, как это показано на рис. 29.

Как следует из приведенного краткого рассмотрения, интегральная оптика позволяет создавать приборы управления лазерным излучением с рекордными параметрами по габаритам, частоте переключения и управляющей мощности по сравнению с объемным вариантом. Однако, безусловно, выбор конкретного варианта построения, например, дефлектора будет зависеть от многих факторов, таких, например, как мощность лазера, допустимые потери на ввод — вывод излучения, требований к параметрам излучения — расходимости, когерентности, поляризации и т. п.

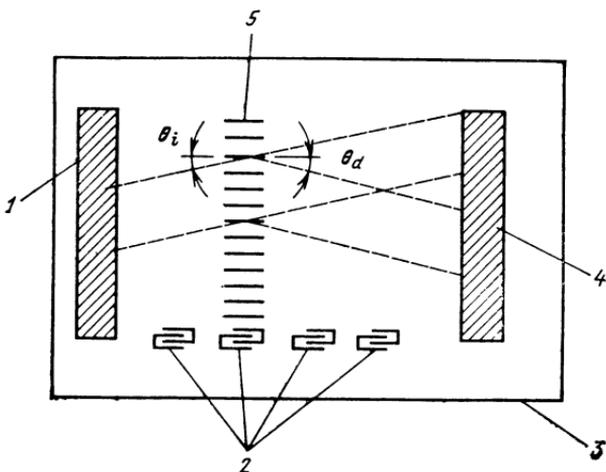


Рис. 29. Многоэлементный тонкопленочный акустооптический дефлектор:

1 — элемент ввода излучения; 2 — электроакустические преобразователи; 3 — тонкая пленка на пьезоэлектрической подложке; 4 — элемент вывода излучения; 5 — акустические поверхностные волны

Глава II

Принципы построения матричного оптоэлектронного процессора с управляющими операторами

5. Основные представления о системах счисления

В цифровых вычислительных машинах действия производятся над числами, представленными в виде специальных машинных кодов в принятой для данной машины системе счисления. Под системой счисления понимается способ наименования и изображения чисел с помощью символов, имеющих определенные количественные значения. Символы, применяемые для изображения чисел, называются цифрами. В зависимости от способа изображения чисел с помощью цифр системы счисления делятся на позиционные и непозиционные.

Позиционной называется система счисления, в которой количественное значение каждой цифры зависит от ее места (позиции) в числе. В позиционной системе счисления любое число записывается в виде последовательности цифр $A = \pm a_{m-1} a_{m-2} \dots a_k \dots a_1 a_0 a_{-1} \dots a_{-l}$. Позиции, пронумерованные индексами k , в данном случае в пределах $-l \leq k \leq m-1$ называются разрядами чисел. Сумма $m+l$ соответствует количеству разрядов числа, в котором целая часть имеет m разрядов, а дробная — l разрядов. Каждая цифра a_k в записанной последовательности может принимать одно значение из некоторого количества N возможных значений, т. е.

$N-1 \geq a_k \geq 0$. Количество различных цифр, используемых для изображения чисел в позиционной системе счисления, называется основанием системы счисления. Основание N позиционной системы определяет ее название.

В электронных цифровых вычислительных машинах наиболее просто реализуются процессы выполнения арифметических и логических действий над числами, представляемыми в двоичной системе счисления. Это объясняется следующими ее достоинствами. Во-первых, для представления двоичных чисел в машинах можно использовать достаточно простые и надежные электронные элементы, имеющие лишь два устойчивых состояния. Одно из таких состояний принимается 1, другое — 0. Очевидно, это в такой же степени относится и к оптоэлектронным цифровым процессорам. Во-вторых, в двоичной системе счисления достаточно просто выполняются арифметические и логические операции над числами. Действительно, таблицы сложения и умножения одноразрядных чисел предельно просты.

Арифметическое сложение

$$\begin{aligned} 0+0 &= 0; \\ 0+1 &= 1; \\ 1+0 &= 1; \\ 1+1 &= 10. \end{aligned}$$

Арифметическое умножение;

$$\begin{aligned} 0 \times 0 &= 0; \\ 0 \times 1 &= 0; \\ 1 \times 0 &= 0; \\ 1 \times 1 &= 1. \end{aligned}$$

Многоразрядные двоичные числа складываются, вычитаются, умножаются и делятся по тем же правилам, что и в десятичной системе (табл. 13). Арифметическое сложение играет основную роль в вычислительном процессе и поэтому рассмотрим его более подробно. При сложении в одном разряде приходится иметь дело с тремя цифрами: цифры данного разряда первого и второго слагаемых и перенос в данный разряд из младшего разряда. В результате сложения получаются две цифры: цифра данного раз-

Таблица 13

Пример выполнения арифметических операций в десятичной и двоичной системах счисления

Система счисления	Сложение	Вычитание	Умножение	Деление
Десятичная	$\begin{array}{r} + 11,635 \\ 9,125 \\ \hline 20,750 \end{array}$	$\begin{array}{r} - 11,750 \\ 9,125 \\ \hline 2,625 \end{array}$	$\begin{array}{r} \times 13,50 \\ 5,25 \\ \hline 6750 \\ + 2700 \\ \hline 6750 \\ \hline 70,8750 \end{array}$	$\begin{array}{r} 357 \\ - 35 \overline{)5} \\ \hline 00 \end{array}$
Двоичная	$\begin{array}{r} + 1011,101 \\ 1001,001 \\ \hline 10100,110 \end{array}$	$\begin{array}{r} - 1011,110 \\ 1001,001 \\ \hline 10,101 \end{array}$	$\begin{array}{r} \times 1101,10 \\ 101,01 \\ \hline 110110 \\ 110110 \\ \hline 110110 \\ \hline 1000110,1110 \end{array}$	$\begin{array}{r} 100011 \overline{)111} \\ - 111 \\ \hline 00111 \\ - 111 \\ \hline 000 \end{array}$

Таблица, описывающая работу
одноразрядного двоичного сумматора

Входы			Выходы	
Первое слагаемое	Второе слагаемое	Перенос	Сумма	Перенос
0	0	0	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	1	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	1
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1

ряда для суммы и перенос из данного разряда в старший, так что одноразрядный сумматор имеет три входа и два выхода. Работа одноразрядного сумматора может быть описана табл. 14.

Схема, реализующая действия, представленные в этой таблице показана на рис. 30. Приведенная схема формирует сигналы суммы и переноса, определяемые комбинацией входных сигналов, одновременно подаваемых на вход схемы, и не обладает памятью: после снятия сигналов на входе выходные сигналы также снимаются. Полный (многоразрядный) — двоичный сумматор образуется из одноразрядных сумматоров (число которых должно быть равно числу разрядов слагаемых) путем соединения выходов с сигналами переноса в старшие разряды с сигналами переноса из младших.

Для выполнения арифметических операций с числовыми картинками обычные позиционные системы счисления (двоичная, десятичная и др.) не всегда удобны из-за того, что при сложении двух чисел в неблагоприятных случаях переносы из разряда в разряд могут распространяться по всей длине машинного слова. Известен ряд систем счисления, в которых переносы либо отсутствуют, либо распространяются не более, чем на один или два разряда. При этом запись числа обязательно содержит избыточную информацию, что является необходимым условием устранения «длинных» поразрядных переносов. К таким системам счисления относится, например, система счисления в остаточных классах. Эта система основана на N взаимно простых положительных целых числах, называемых основаниями $m_1 m_2 \dots m_N$. Любое число представляется в виде целых положительных остатков от деления на основании m_i . Остаток от деления обозначается $r^i m_i$ и N остатков $(R_{m_1}, R_{m_2}, \dots, R_{m_N})$ по N различным основаниям представляют любое целое число в диапазоне от 0 до $M - 1$, где M — произведение всех оснований $M = \prod_{i=1}^N m_i$. Числа, большие чем M , в данной системе оснований не определены.

Рассмотрим примеры выполнения различных операций в системе остаточных классов. Выберем в качестве оснований числа 5,

Таблица 15

Пример сложения в системе остаточных классов

Числа	Представление чисел в основаниях			
	5	7	9	4
$\begin{array}{r} 19 \rightarrow \\ + 87 \rightarrow \\ \hline 106 \leftarrow \end{array}$	$\begin{array}{r} 4 \\ + 2 \\ \hline 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 5 \\ + 3 \\ \hline 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1 \\ + 6 \\ \hline 7 \end{array}$	$\begin{array}{r} 3 \\ + 3 \\ \hline 2 \end{array}$

Таблица 16

Пример вычитания в системе остаточных классов

Числа	Представление чисел в основаниях			
	5	7	9	4
$\begin{array}{r} 106 \rightarrow \\ - 99 \rightarrow 4103 \rightarrow \\ \hline 7 \rightarrow \end{array}$	$\begin{array}{r} 1 \\ + 1 \\ \hline 2 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1 \\ 6 \\ \hline 0 \end{array}$	$\begin{array}{r} 7 \\ 0 \\ \hline 7 \end{array}$	$\begin{array}{r} 2 \\ 1 \\ \hline 3 \end{array}$

дополняющее до полного основания число. Для цифры 4 дополняющее до полного основания 5 число есть 1, для 1 дополняющее до основания 7 число есть 6 и т. д., а затем полученные числа складываются, как показано выше. Пример умножения в системе остаточных классов показан в табл. 17. Оба сомножителя перево-

Таблица 17

Пример умножения в системе остаточных классов

Числа	Представление чисел в основаниях			
	5	7	9	4
$\begin{array}{r} 13 \rightarrow \\ 12 \rightarrow \\ \hline 26 \\ 13 \\ \hline 156 \rightarrow \end{array}$	$\begin{array}{r} 3 \\ \times 2 \\ \hline 1 \end{array}$	$\begin{array}{r} 6 \\ \times 5 \\ \hline 2 \end{array}$	$\begin{array}{r} 4 \\ \times 3 \\ \hline 3 \end{array}$	$\begin{array}{r} 1 \\ \times 0 \\ \hline 0 \end{array}$

дятся в остатки, а произведение остатков в каждой колонке выражается опять через остаток по соответствующему основанию. Результат умножения в остатках 1, 2, 3, 0 есть представление в остатках десятичного числа 156.

Из этих примеров видно, что вычисления в остаточных классах довольно хорошо подходят для оптических цифровых процессоров. Отсутствие переносов позволяет выполнять все операции параллельно, так как результаты операций по отдельным основаниям не связаны друг с другом.

Представляет несомненный интерес позиционная система счисления с двойной избыточностью. В этой системе счисления каждая цифра записывается двумя символами (полуразрядами), вследствие чего она называется системой счисления с полуразрядами (СПР). В СПР с основанием 2 сохраняется полиномиальная форма записи двоичного числа, но каждая цифра его состоит из двух частей: $h_i = \beta_i 2^1 + \alpha_i 2^0$, т. е. в каждом разряде могут быть две цифры; нуль — 00, единица — 01, два — 10, три — 11. Нормальной формой записи двоичного разряда является «однозначная» с нулевым значением старшего полуразряда, а при образовании дополнительного или обратного числа в каждой цифре инвертируется только младший полуразряд.

В системе счисления с полуразрядами арифметические операции также выполняются без переноса из разряда в разряд. Суммирующее устройство может работать по алгоритму, основанному на том, что операция арифметического сложения в этой системе счисления может быть выражена через логические операции И и сложение по модулю 2 над исходными слагаемыми, если результаты первой операции сдвигаются влево на один полуразряд и складываются логически с результатами второй операции, т. е.

$$C' = (a \oplus b) \vee (a \cdot b) \leftarrow \frac{1}{2}$$

где $a \oplus b$ — поразрядная сумма; $(a \cdot b) \leftarrow \frac{1}{2}$ — результат логиче-

ского умножения чисел с последующим сдвигом на один полуразряд. В связи с избыточностью СПР в результате суммирования может появиться запись чисел не в нормальной форме. Число 2 вместо 0100 может быть представлено как 10, а число 3 — как 11 вместо 0101. Это не дает возможности суммировать одновременно более двух картин, так как комбинации 10, 11, полученные в результате сложения двух чисел, должны быть до следующего арифметического действия приведены к нормальной форме.

Существенный интерес для построения оптоэлектронного цифрового процессора представляет система счисления, называемая знакоразрядными представлениями ЗРП. Знакоразрядные представления являются позиционными избыточными системами, в которых каждый разряд изображается цифрой со знаком. Основанием может быть любое целое положительное число, превышающее 2. Если при обычном представлении чисел в системах счисления с целым основанием ($N > 1$) каждая цифра может принимать только N значений: 0, 1, 2... ($N-1$), то при знакоразрядном представлении каждая цифра может принимать g значений в соответствии с соотношением $N + 2 \leq g \leq 2N - 1$. В ЗРП используются как положительные, так и отрицательные числа, а количество используемых цифр больше, чем в обычных позиционных системах. Таким образом, в ЗРП существует избыточность, благодаря которой каждый разряд суммы или разности является функцией чисел, расположенных только в двух соседних разрядах каждого числа, участвующего в операции. Поэтому в знакоразрядном представлении можно выполнять полностью параллельные сложения и вычитания, причем время выполнения операции всегда равно времени сложения или вычитания цифр, стоящих в одноименных разрядах операндов.

Поскольку умножение сводится к последовательности сложений и сдвигов, а деление — к последовательности вычитаний и

сдвигов, то нетрудно понять, что все четыре основные арифметические операции могут выполняться в оптоэлектронном процессоре параллельными методами.

Перечисленные системы счисления позволяют использовать с большой эффективностью возможности параллельной обработки информации в оптоэлектронных цифровых процессорах, причем возможности выбора наиболее эффективных систем счисления далеко еще не исчерпаны.

6. Метод управляющих операторов в оптоэлектронных цифровых процессорах

Существующие электронные вычислительные машины обладают определенными принципиальными недостатками. Средствами запоминания и обработки информации в них являются электронные схемы, которые реализуют строго заданные операции, т. е. в ходе использования этих схем нельзя изменять виды выполняемых операций. Это приводит к созданию специализированных логических и функциональных схем, таких как сумматор, счетчик, инвертор, дешифратор и других, — основных элементов ЭВМ.

Очевидно, что практически невозможно создать столько блоков и схем, чтобы все или хотя бы большинство встречающихся в процессе вычисления операций можно было реализовать за один такт, т. е. за время обращения к соответствующему блоку или схеме. Поэтому в ЭВМ используется ограниченный набор разнообразных базисных операций, т. е. операций, реализуемых аппаратно, без программного управления.

Как следствие, универсальные ЭВМ, предназначенные для решения широкого круга задач, имеют большое программное управление. А так как разные вычислительные операции выполняются с помощью последовательности базисных операций, то это приводит к неэффективному использованию, а в некоторых случаях и к невозможности использования в универсальных ЭВМ заложенного в них быстродействия и объема памяти. Хорошим примером служит тот факт, что даже очень высокопроизводительные ЭВМ не способны решать задачи распознавания образов в реальном масштабе времени.

Более эффективное использование быстродействия и оборудования достигается в ЭВМ специализированного назначения. Каждая такая машина имеет свою специфику построения, связанную с типом решаемых задач. Так, например, при решении одной задачи с разными данными упрощается устройство хранения программы, которое

работки информации, представляющий из себя один и тот же оптический канал для всех базисных операций, и буферную оперативную оптическую память для обмена обрабатываемой информацией. Метод управляющих операторов отличается от табличного метода вычислений (сущность которого заключается в хранении в памяти результатов операций) тем, что в памяти находятся виды операций, а не их результаты. На языке электроники операторы выполняют функции логических и арифметических электронных устройств.

Схема одного из возможных вариантов оптического процессора, в котором организован указанный тракт, приведена на рис. 31. Процессор работает следующим образом. Массив входных переменных, хранящийся в памяти 2, проецируется на блок 3 и на него же из памяти 1 поступают операторы $\hat{\phi}$. В блоке 3 при наложении страницы переменных со страницей операторов происходит соответствующая обработка переменных. Результат считывается из блока 3, вновь записывается в память 2 и затем может служить либо для дальнейших вычислений, либо для вывода на внешние устройства. Отметим, что блок 3 реализуется на основе быстродействующих цифровых оптически управляемых транспарантов.

В качестве памяти 1 целесообразно использовать достаточно разработанные голографические запоминающие устройства. На голограммах может быть записана двумерная информация в дискретной, аналоговой, буквенной и т. д. форме. Применение голографической памяти для хранения операторов объясняется и такими свойствами голографической записи информации, как высокая помехоустойчивость, быстрое страничное считывание и т. д.

Функциональная схема оптоэлектронного процессора

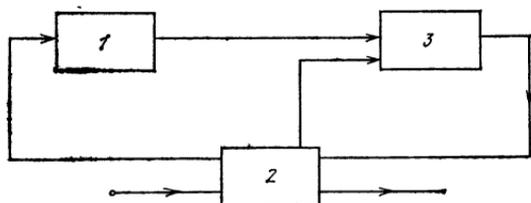


Рис. 31. Вариант построения оптоэлектронного процессора с управляющими операторами:

1 — оптическая память для хранения управляющих операторов $\hat{\phi}$; 2 — буферная оптическая оперативная память; 3 — блок оптической обработки информации, состоящий из совокупности оптически управляемых транспарантов

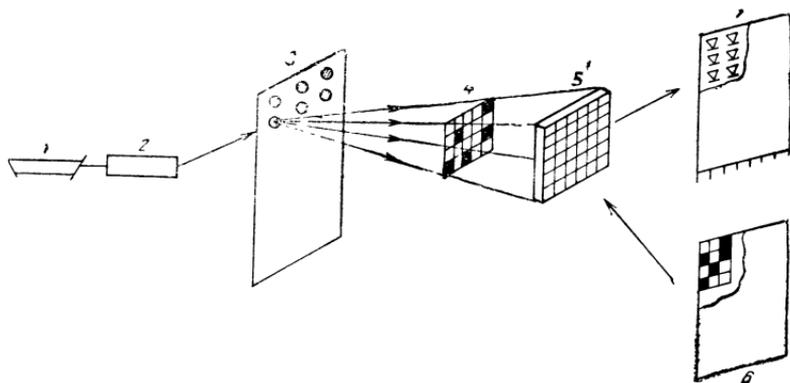


Рис. 32. Функциональная схема оптоэлектронного блока обработки информации:

1 — лазер; 2 — дефлектор; 3 — матрица голограмм; 4 — восстановленное изображение оператора; 5 — цифровой оптически управляемый транспарант; 6 — числовая картина; 7 — входная поверхность следующего транспаранта

представлена на рис. 32. Основным элементом в оптической схеме обработки дискретных изображений, где осуществляется действие оператора на входные переменные, является цифровой оптически управляемый транспарант. Обработку на транспаранте удобнее всего организовать на основе реализации выражений:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } z_{ij} = 1 \text{ и } x_{ij} = 1; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } z_{ij} = 0 \text{ и } x_{ij} = 1; \\ 0 & \text{в остальных случаях,} \end{cases} \quad (5)$$

где $\{x_{ij}\}$ — обрабатываемое изображение; $\{z_{ij}\}$ — оператор; $\{y_{ij}\}$ — выходные переменные. Равенства (4) и (5) означают, что если оптические свойства транспаранта, работающего на отражение (пропускание), промодулированы изображением $\{z_{ij}\}$, то, подавая на него другое изображение $\{x_{ij}\}$, будем иметь отраженный (пройденный) свет только в тех ячейках ОУТ, где есть свет от z_{ij} и x_{ij} или только от x_{ij} . В качестве основы для построения можно взять любое из определений (4), (5)

действия оператора $\hat{\phi}$. Выбор определяется типом применяемого транспаранта и требованием полноты булевых операций над переменными. На рис. 33 в качестве примера показано преобразование (2) входной переменной $\{x_i\} = 101$ матрицей

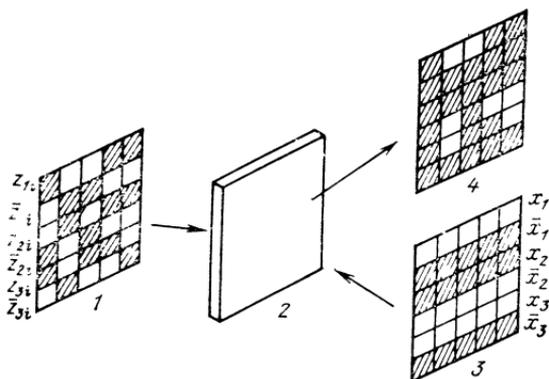


Рис. 33. Пример преобразования входной переменной операторной матрицей:

1 — входное операторное поле; 2 — оптически управляемый транспарант, работающий на отражении; 3 — входное числовое поле; 4 — результат вычисления

$$\{z_{ij}\} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Переменные и операторы представлены в парафазном коде; светлая клетка означает наличие света, темная — его отсутствие. Отраженный свет имеется лишь в тех клетках, на которые свет падает с обеих сторон.

Рассмотрим примеры вычисления элементарных конъюнкций и дизъюнкций методом управляющих операторов. Как известно, эти операции являются основными для выполнения многих логических и арифметических операций. Пусть необходимо вычислить элементарную конъюнкцию $K = x_1 x_2 x_3 x_4$, где x_i — двоичные переменные, а K — результат конъюнкции. Для вычисления конъюнкции необходимо воспользоваться парафазным представлением двоичных переменных, т. е. 1 представить как 10, а 0 — как 01.

На рис. 34 представлена оптическая схема выполнения такой операции и вид операторного поля для вычисления конъюнкции $K = x_1 x_2 x_3 x_4$. Отраженный свет может быть только в тех ячейках транспаранта, где присутствует свет с обеих сторон транспаранта, т. е. от операторного и числового полей. Цилиндрическая линза собирает отраженный свет в вертикальном направлении. Наличие света в фокальной плоскости линзы означает, что конъюнкция равна 0, а его отсутствие — 1. Очевидно, что $K=1$ только на наборе 1111, в любом другом случае

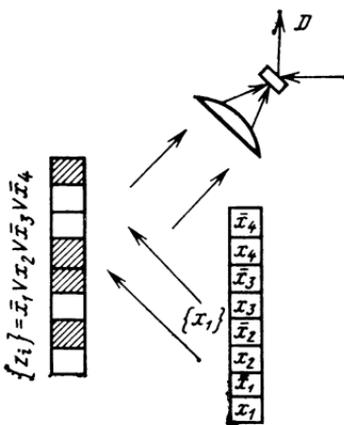


Рис. 34. Оптическая схема и вид операторного поля для вычисления конъюнкции $K = x_1x_2x_3x_4$ (в фокальной плоскости линзы расположена ячейка транспаранта — инвертора)

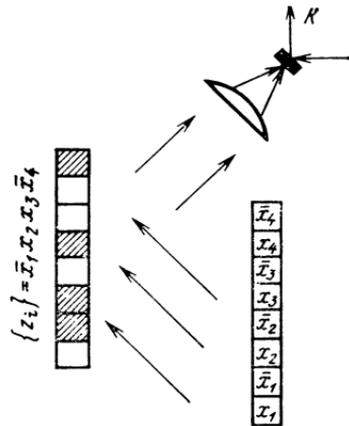


Рис. 35. Оптическая схема и вид операторного поля для вычисления конъюнкции $K = x_1x_2x_3\bar{x}_4$ (в фокальной плоскости линзы расположена ячейка транспаранта — инвертора)

будет отраженный свет хотя бы от одной ячейки транспаранта, т. е. свет будет и в фокальной плоскости линзы, что означает, что $K=0$. В фокальной плоскости линзы располагается детектор — ячейка цифрового управляемого транспаранта, отражение от которого будет в том случае, если на его вход не попадает свет, т. е. ячейка выполняет функцию инверсирования сигнала: в фокальной плоскости линзы формируется \bar{K} , а отраженный от ячейки детектора свет реализует K .

При выполнении логических и арифметических операций методом управляющих операторов важен порядок расположения значащих клеток в операторном и числовом полях. Так, если мы приняли для чисел, что 1 представляется светлой, а затем темной клеткой, то операторное поле для вычисления конъюнкции представляется сначала темной, а затем светлой клеткой.

Если в элементарной конъюнкции встречаются члены с отрицанием, например, необходимо вычислить $K = \bar{x}_1x_2x_3\bar{x}_4$, то в соответствующем операторном поле необходимо поменять местами светлую и темную клетки для членов конъюнкции x_i . На рис. 35 представлено операторное поле для вычисления конъюнкции $K = \bar{x}_1x_2x_3x_4$. Очевидно, что отраженного света в фокальной плоскости

не будет только в наборе переменных 0110, в любом другом случае отраженный свет будет хотя бы от одной клетки, что означает, что $K=0$.

Аналогичным образом выполняется операция дизъюнкции $D=x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$. Операторное поле для выполнения этой дизъюнкции представлено на рис. 36. Оно отличается от поля предыдущего примера порядком следования светлых и темных ячеек. Видно, что отраженного света не будет только в наборе 0000 и тогда $D=0$. В любом другом наборе в фокальной плоскости линзы интенсивность света отлична от 0 и $D=1$. Если в дизъюнкции входят переменные с отрицанием, то надо также поменять порядок следования светлых и темных клеток в операторном поле. На рис. 37 представлены операторные поля для вычисления дизъюнкции $D=\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4$. Видно, что отраженный свет будет только в наборе переменных 1011, в любом другом случае свет будет попадать на детектор и от него возникнет отраженный сигнал, т. е. $D=1$.

Оптические схемы вычислений конъюнкций и дизъюнкций от многих переменных одинаковы за исключением того обстоятельства, что для получения конъюнкции в качестве детектора используется ячейка транспаранта, инвертирующая сигнал. Если в обеих схемах использовать один и тот же детектор, отражающий сигнал

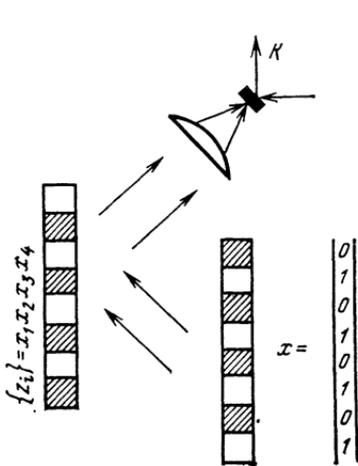


Рис. 36. Оптическая схема и вид операторного поля для вычисления дизъюнкции $D=x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$

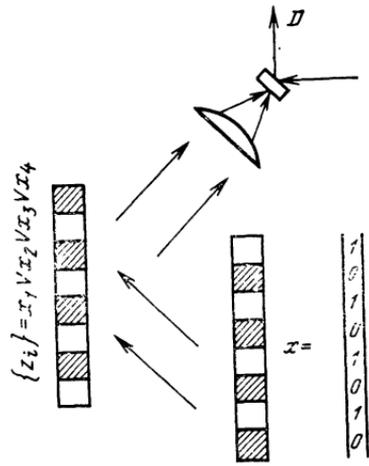


Рис. 37. Оптическая схема и вид операторного поля для вычисления дизъюнкции $D=\bar{x}_1 \vee x_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4$

только в случае, когда на его входе есть свет, то в схемах рис. 34 и 35 на выходе будет представлен сигнал \bar{K} .

В силу того, что в алгебре логики выполняются за-

коны $\left(\bigwedge_{i=1}^n x_i\right) = \bigvee_{i=1}^n \bar{x}_i$ и $\left(\bigvee_{i=1}^n x_i\right) = \bar{x}_i$ можно заключить, что

любая из схем, представленных на рис. 34—37, может служить как для вычисления конъюнкций от многих переменных, так и для вычисления дизъюнкций. Очевидно, что при размерности цифрового оптически управляемого транспаранта $N \times N$ элементов за один такт вычисляются N различных конъюнкций или дизъюнкций от $N/2$ переменных. В этом случае в схемах на рис. 34—37 нужно использовать линейки детекторов с числом элементов N .

Известно, что все логические функции можно представить в виде дизъюнктивной нормальной формы, т. е. логической суммы элементарных конъюнкций. Поэтому блок Z (см. рис. 31), в котором происходит обработка операндов, может состоять из двух связанных транспарантов, образующих общий канал обработки информации. При этом первый оптически управляемый транспарант может быть использован как операционная пластина, реализующая в зависимости от оператора набор элементарных конъюнкций, например, вида:

$$\begin{aligned} f_1 &= x_1 x_2 \dots x_i \dots x_{n-1} x_n; \\ f_2 &= x_1 \bar{x}_2 \dots \bar{x}_i \dots x_{n-1} x_n; \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ f_k &= \bar{x}_1 x_2 \dots x_i \dots \bar{x}_{n-1} x_n. \end{aligned}$$

Второй транспарант может быть использован как коммутационная пластина, реализующая набор дизъюнкций вида:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1 \vee f_2 \vee \dots \vee f_i \vee \dots \vee f_{n-1} \vee f_n; \\ y_2 &= \bar{f}_1 \vee \bar{f}_2 \vee \dots \vee \bar{f}_i \vee \dots \vee \bar{f}_{n-1} \vee \bar{f}_n; \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ y_k &= f_1 \vee \bar{f}_2 \vee \dots \vee f_i \vee \dots \vee \bar{f}_{n-1} \vee \bar{f}_n. \end{aligned}$$

В некоторых конкретных случаях может оказаться целесообразным воспользоваться несколько большим количеством ОУТ, например тремя, причем третий может служить для распределения результата по определенным ячейкам двумерной дискретной страницы, чтобы удобнее было использовать его для последующей обработки.

Таким образом, с помощью этих трех пластин ОУТ

возможно практически реализовать в каждый такт времени любые логические зависимости в объеме до 10^4 двоичных переменных. При этом все реализуемые логические зависимости задаются в виде двумерных операторов, хранимых в голографической памяти.

7. Особенности обработки информации в оптоэлектронном матричном процессоре с управляющими операторами

Функциональные возможности ЭВМ основываются на двух фундаментальных идеях. Первая из них состоит в том, что программа вводится через те же внешние устройства и хранится в той же памяти, что и исходные данные. Это обеспечивает оперативную перестройку машины с одной задачи на другую без внесения каких-либо изменений в схему машины и ее коммутацию, делая машину универсальным вычислительным инструментом. Вторая идея заключается в том, что инструкции, составляющие программу вычислений, закодированы в виде чисел и по форме ничем не отличаются от тех чисел, с которыми оперирует машина.

Это дает возможность при выполнении некоторой инструкции прочесть другую или, в частном случае, ту же инструкцию как число, переслать ее в арифметическое устройство, произвести там с ней некоторые операции и вернуть на свое место в запоминающем устройстве, т. е. в свою ячейку памяти в преобразованном виде. Когда в следующий раз устройство управления обратится к данной ячейке памяти за инструкцией, а не за операндом, то исполняться будет уже не исходная, а преобразованная инструкция. Таким образом, при исполнении некоторой программы может одновременно происходить и ее преобразование.

Почти столь же важным фактором является такое обстоятельство, как наличие в списке операций устройства управления машины операций передачи управления. Если бы все инструкции, составляющие программу решения некоторой задачи, должны были выполняться только в одной последовательности, так как они расположены в запоминающем устройстве, то в ходе решения любой задачи каждая инструкция исполнялась бы однократно. При этом на машине можно было бы, в принципе, ставить сравнительно простые задачи, для решения которых требуется исполнить не больше операций, чем количество инструкций, которое может разместиться од-

новременно в памяти машины. Однако даже и эти задачи не имело бы смысла решать на машине, поскольку ясно, что написание каждой инструкции для машины и перенесение затем этой инструкции на перфоленту, перфокарту или другой машинный носитель занимает никак не меньше времени, чем выполнение вручную той единственной операции, которую может исполнить машина в соответствии с этой инструкцией при прохождении программы.

Совершенно очевидно, что эти возможности сохраняются и в оптическом процессоре. Действительно, организация ввода, вывода и обмена данными выполнена так же, как в ЭВМ, а наличие в списке операций устройства управления оптической вычислительной машины операций передачи управления всегда может быть предусмотрено. Но кроме этого оптический процессор имеет ряд весьма важных особенностей, которые могут обеспечить большую производительность при решении самых разнообразных задач.

Обработка информации ведется на цифровых оптически управляемых транспарантах, емкость которых для целей цифровой обработки может достигать 10^4 бит и более, причем эта обработка выполняется параллельно. Такая высокая параллельность обработки позволяет использовать матричную и векторную организации вычислений. Следует отметить, что в самое последнее время эти операции пытаются воспроизвести и в электронике. Созданы и создаются высокопроизводительные ЭВМ на основе векторной обработки данных (Cray-1, Cray-2, Star-100, ASC и др.), однако при решении задач, требующих по своей природе последовательной обработки, большая часть производительности таких машин теряется.

Используемый метод управляющих операторов дает еще одну особенность — возможность значительного распараллеливания по командам. Если в мощных ЭВМ число аппаратно реализуемых логических и других операций достигает нескольких сотен (как правило, 100—200), то в оптическом процессоре количество управляющих операторов может доходить до 10^4 . Действительно, поскольку емкость существующих постоянных голографических ЗУ оценивается в 10^8 бит, а объем страницы ПВМС равен 10^4 бит, то количество базисных операторов может составлять 10^4 . Большое число базисных операторов позволяет на основе более широкого набора

базисных операций разработать более короткий алгоритм вычисления задачи, а кроме того, появляется принципиальная возможность эффективно решать задачи, как требующие матричной организации, так и нуждающиеся в последовательной обработке. Необходимо подчеркнуть, что распараллеливание по командам в оптическом процессоре до 10^4 операторов равносильно наличию такого же числа разных логических и других схем и блоков в ЭВМ. Однако последнее практически невозможно, поскольку увеличиваются габариты, затрудняется коммутация между отдельными электронными устройствами и т. д. Часть операторов может быть специально подобрана для решения задач, наиболее часто встречающихся в процессе вычислений.

Одним из основных отличий оптического процессора от ЭВМ является отсутствие специализированных блоков и схем. Таким образом, отпадает необходимость реализации связей между отдельными логическими, арифметическими и т. д. устройствами. Общий тракт обработки информации на ОУТ заменяет различные специализированные блоки и схемы. Если операторную память выполнить на реверсивной среде, то можно образовывать новые и изменять старые базисные операторы в процессе счета и с учетом результатов счета. Следовательно, в таком процессоре операторы могут зависеть и от переменных, над которыми производятся вычисления. Реализация таких переменных, зависимых от операндов базисных операторов, не имеет аналога в традиционных ЭВМ, ибо это было бы равносильно оперативному добавлению некоторых вычислительных устройств или перестройке существующих в ЭВМ. Такая реализация позволяет легко перестраивать на логическом уровне работу процессора и обеспечивает ему большую гибкость и производительность. Возможно также, что в некоторых случаях перестраиваемость оптического процессора как на уровне программ, так и на логическом уровне и особенности оптической обработки в нем двумерных массивов информации позволяют специальными способами вычислять весьма сложные, часто встречающиеся в процессе счета функции, вычисление которых на ЭВМ обычными способами сопряжено с серьезными трудностями. Так, например, применение принципа ассоциативной обработки информации позволяет выполнять весьма сложные преобразования при использовании небольшого количества оборудования.

Тракт обработки оптического процессора с управляющими операторами состоит из нескольких ОУТ, связанных между собой. На первом вычисляются конъюнкции, на втором — дизъюнкции, а третий распределяет информацию по соответствующим адресам в оперативную память. На транспарантах производится последовательная обработка переменных, т. е. результаты обработки на первом транспаранте подаются на второй и т. д. Все транспаранты соединены в один оптический канал, что предъявляет определенные требования при разработке оптической связи между ОУТ.

Простейшим вариантом связи является применение цилиндрических линз. Такие линзы собирают свет со строчек или столбцов и реализуют ту дизъюнкцию или конъюнкцию обрабатываемых переменных, которые задаются управляющими операторами. Для полноты булевого базиса необходимо выполнять еще операцию инвертирования. Операция отрицания выполняется с помощью линейки инвертирующего транспаранта, электронная логика которого работает таким образом, что отражения света от управляемой поверхности нет, если на ячейку управляющей поверхности падает свет. Собранный в фокальной плоскости цилиндрической линзы свет после транспаранта необходимо снова развести в строку или столбец для дальнейшей обработки. Эта операция также выполняется цилиндрической линзой. Усиление оптических сигналов происходит при отражении за счет энергии излучения, освещающего управляемую поверхность транспаранта. Этот способ оптической связи транспарантов является простейшим для реализации, но обладает существенным недостатком — свет собирается со всего столбца или строки во всех случаях, даже если необходимо выполнить простейшую операцию, например конъюнкцию двух переменных. В этом случае из строки длиной 100 бит используется только четыре ячейки и, следовательно, возможности параллельной обработки сужаются: например, нельзя вычислять конъюнкции с меняющимся в ней числом элементов. Существенный выигрыш в функциональных возможностях может быть получен при организации в цифровом оптически управляемом транспаранте близкодействия, т. е. электрической связи соседних ячеек вдоль строки или столбца. Такой транспарант обладает рядом особенностей в отличие от обычных типов ОУТ.

Во-первых, если управляющий световой сигнал попа-

дает в какую-либо ячейку такого транспаранта, то меняются оптические характеристики не только данной ячейки, но и ячеек, образующих вместе с данной столбец или строку. Во-вторых, количество связанных друг с другом ячеек может меняться в зависимости от некоторого сигнала, оптического или электрического, называемого сигналом настройки. В этом случае можно менять длину столбца или строки, переключаемую управляющим сигналом, попадающим на одну ячейку. Технология транспарантов с близкодействием не отличается от технологии «матрицы»; необходимо дополнительно связать отдельные интегральные схемы каждой ячейки электронными ключами, причем включены они или нет зависит только от сигналов настройки. Транспаранты с близкодействием для оптической связи ОУТ играют такую же роль, которую выполняла бы матрица цилиндрических линз с переменным числом элементов в строке.

На рис. 38 представлено схематическое изображение такого транспаранта. Принцип работы цифрового транспаранта с близкодействием такой же, как и обычного цифрового транспаранта. Однако при наличии сигнала на управляющей поверхности некоторой ячейки происходит переключение как этой ячейки, так и соседней, если, конечно, предварительным сигналом настройки ключ между ними замкнут.

Таким образом, при использовании одного ОУТ и описанного транспаранта с близкодействием, распространяемым на строки (или столбцы), можно одновременно вычислять набор конъюнкций или дизъюнкций вида:

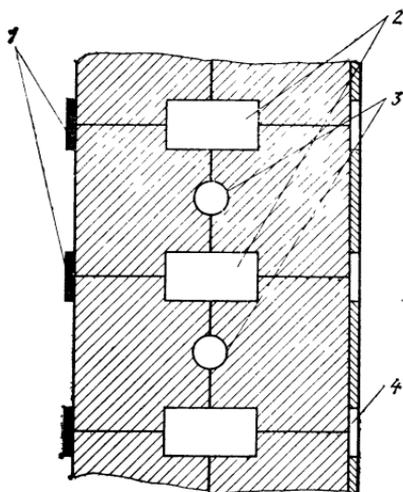


Рис. 38. Схема оптически управляемого цифрового транспаранта с близкодействием:

1 — фотоприемники управляющей поверхности; 2 — микроэлектронные ячейки, управляющие коэффициентом отражения светоклапанных ячеек; 3 — электронные ключи, связывающие соседние ячейки; 4 — управляемые светоклапанные ячейки выходной поверхности

$$K_1 = a_1 a_2; \quad D = a_1 \vee \bar{a}_2 \vee a_3;$$

$$K_2 = a_3 \bar{a}_4 \bar{a}_5; \quad D_2 = a_4 \vee a_5;$$

$$\bar{K}_n = a_i \dots \bar{a}_{N_c}; \quad D_n = \bar{a}_i \vee \dots \vee \bar{a}_{N_c}$$

с помощью лишь одной строки (или столбца) ($N_c = N/2$, где N — размер строки или столбца).

Очевидно, что количество возможных вариантов конъюнкций и дизъюнкций, задаваемое сигналом на строки, весьма велико. Сигналы настройки должны задаваться устройством управления и храниться в памяти. Ясно, что сигналы настройки могут меняться не при каждом цикле счета.

На рис. 39 представлена структурная схема возможного варианта построения блока обработки информации. Промодулированный управляющим оператором и числовыми картинками свет от ОУТ 1 попадает на плоско-цифровой транспарант с близкодействием 2, строки и столбцы которого настроены на выполнение конъюнкции и дизъюнкций K_i, D_i . На транспарант предварительно поданы сигналы настройки. Настройка его может осуществляться с помощью матричной системы адресных шин. При матричной адресации последовательно производится настройка каждого столбца или строки для выполнения множества конъюнкций или дизъюнкций вида K_i или D_i . Считанная информация проецируется на уп-

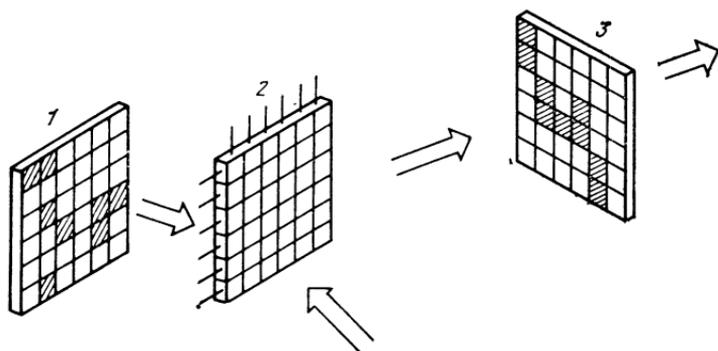


Рис. 39. Безлинзовая схема построения тракта обработки информации на основе промежуточного транспаранта с функциями близкодействия:

1 — картина на выходе управляемого транспаранта; 2 — транспарант с близкодействием; 3 — результирующая картина

равляемую поверхность транспаранта 3 для дальнейшей обработки. Использование цифрового транспаранта с управляемыми связями по строкам или столбцам в качестве связующего и обрабатывающего элемента позволяет производить двумерную обработку чисел, представленных в построчном виде.

8. Виды управляющих операторов для основных логических и арифметических операций

В электронных вычислительных машинах выполняется целая серия логических операций и команд. Приведем некоторые из них, наиболее часто встречающиеся в процессе вычислений: логическое сложение, логическое умножение, сравнение, инвертирование, сдвиг влево и вправо на один ряд, сложение по модулю 2 и др. Часть этих операций выполняется на одних и тех же электронных схемах или с незначительными добавлениями оборудования, например сложение по модулю 2, инвертирование. Другая же часть осуществляется на разных электронных схемах, например сдвиг и логическое сложение, логическое сложение и логическое умножение и т. д. В оптоэлектронном же процессоре с переменными операторами все логические операции реализуются за один такт, т. е. за одно обращение к операторной памяти, в одном и том же оптическом канале и на одних и тех же элементах, только различные операции требуют проецирования различных операторов.

Рассмотрим выполнение некоторых операций в оптоэлектронном процессоре.

Сложение по модулю 2. Для наглядности рассмотрим сложение по модулю 2 двух трехразрядных чисел: $A = a_1 a_2 a_3 = 101$ и $B = b_1 b_2 b_3 = 110$. Результат обозначим $Q = g_1 g_2 g_3$. Результат сложения по модулю 2 вычисляют по формуле $g_i = \bar{a}_i b_i \vee a_i \bar{b}_i$, т. е. в приведенном примере $Q = g_1 g_2 g_3 = 011$. Схема, реализующая сложение по модулю 2, показана рис. 40. На управляющую поверхность оптического цифрового транспаранта подается оператор $\hat{\varphi} = \{z_{ij}\}$, соответствующий сложению по модулю 2, который изменяет отражающие свойства управляемой поверхности. На управляемую поверхность проецируются складываемые числа. Каждый из столбцов реализует выражение $a_i b_i$. С j -го столбца не будет света только в том случае, когда входные сигналы не совпадут ни с одной светлой клеткой в столбце. Цилиндрическая лин-

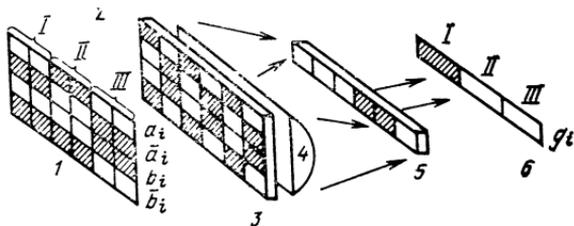


Рис. 40. Оптическая схема и операторные поля для сложения по модулю 2 двух трехразрядных чисел:

1 — входные переменные, представленные в парафазном коде; 2 — операторное поле для сложения по модулю 2; 3 — цифровой оптически управляемый транспарант; 4 — цилиндрическая линза; 5 — линейка инверторов; 6 — результат вычисления

за собирает отраженные сигналы со всех элементов каждого столбца. После инвертора свет будет только в том случае, если от столбца не будет отраженного сигнала. Если инверторы объединить попарно, то каждой паре будет соответствовать один разряд. Следовательно, наличие света в каком-либо из двух инверторов означает, что в данном разряде $g_i=0$, в противном случае $g_i=1$.

В общей структуре процессора, состоящей из совокупности оптически связанных транспарантов, операторные поля, реализующие поразрядное сложение двух двоичных чисел, представлены на рис. 41. Аналогичным образом можно выполнять сложение по модулю 2 трех, четырех и т. д. n -разрядных чисел. На рис. 42 представ-

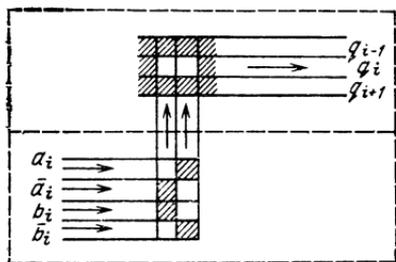


Рис. 41. Операторные поля для поразрядного логического сложения двух двоичных чисел в оптоэлектронном тракте, состоящем из двух оптически связанных цифровых транспарантов (представлены операторные поля для первого и второго транспарантов)

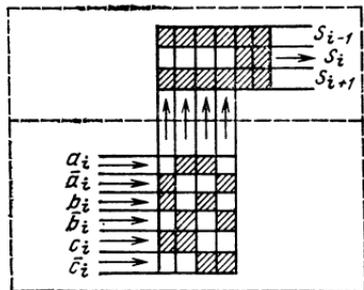


Рис. 42. Операторные поля для поразрядного логического сложения трех двоичных чисел в оптоэлектронном тракте, состоящем из двух оптически связанных цифровых транспарантов (представлены операторные поля для первого и второго транспарантов)

лены управляющие изображения для поразрядного логического сложения трех двоичных чисел.

Сдвиг на заданное число разрядов. В оптоэлектронном процессоре можно выполнять сдвиг вправо и влево на любое заданное число разрядов за один такт. Покажем для примера, каким образом выполняется сдвиг трехразрядного числа $A = a_1 a_2 a_3$ на разряд вправо. Сдвиг выполняется на двух оптических цифровых транспарантах. На рис. 43 показан вид операторных полей, подаваемых на транспаранты ОУТ-1 и ОУТ-2. Входные переменные подаются на первый транспарант в виде горизонтальных полос света. Свет будет отражаться только от тех клеток, на которые попадает как свет от оператора, так и свет от входных переменных. Отраженный свет от ячейки разворачивается цилиндрической линзой в столбец и подается на следующий транспарант в виде вертикальных полосок света. Оператор, проецируемый на этот транспарант, модулирует эти столбцы и на выходе, т. е. в свете, отраженном от второго транспаранта, получается число $B = b_1 b_2 b_3 b_4$, равное числу A , но сдвинутое на один разряд вправо. Из рис. 43 и вышесказанного видно, что можно реализовать за один такт сдвиг числа на любое число разрядов, для чего необходимо только изменить определенным образом операторное поле, подаваемое на второй транспарант.

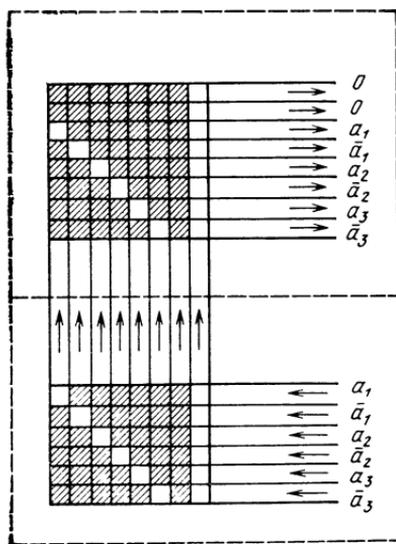


Рис. 43. Операторные поля для сдвига вправо на один разряд

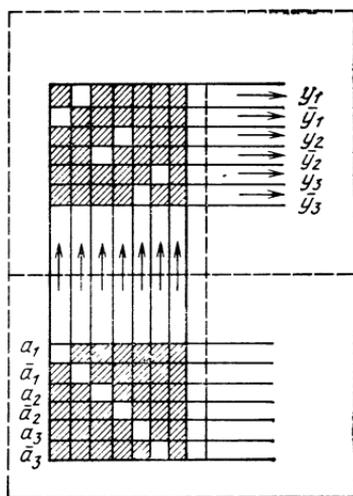


Рис. 44. Операторные поля для инвертирования числа

Инвертирование числа. Эта операция осуществляется с помощью операторных полей в виде, указанном на рис. 44.

Дешифрирование. Дешифратором называют устройство, в котором каждой комбинации входных переменных соответствует выходной сигнал на одном определенном выходе. В общем случае дешифратор имеет n входов и 2^n выходов и служит для преобразования кода слова в управляющий сигнал на одном из выходов.

В вычислительных машинах дешифраторы применяются для выдачи сигналов в те или иные цепи управления в зависимости от входного слова. Так, например, дешифратор может преобразовывать код операции в управляющий сигнал, который может использоваться для настройки арифметического устройства на выполнение операции. Рассмотрим случай $n=3$. Тогда уравнения, описывающие работу дешифратора, имеют вид:

$$y_1 = \bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3; \quad y_3 = \bar{a}_1 a_2 \bar{a}_3; \quad y_5 = a_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3; \quad y_7 = a_1 a_2 \bar{a}_3;$$

$$y_2 = \bar{a}_1 \bar{a}_2 a_3; \quad y_4 = \bar{a}_1 a_2 a_3; \quad y_6 = a_1 \bar{a}_2 a_3; \quad y_8 = a_1 a_2 a_3,$$

а операторные поля, осуществляющие операцию дешифрирования на три входа, представлены на рис. 45.

Вычисление логических функций. В процессе вычислений встречается необходимость реализовывать логические функции многих переменных. В ЭВМ каждой реальной логической операции становится в соответствие

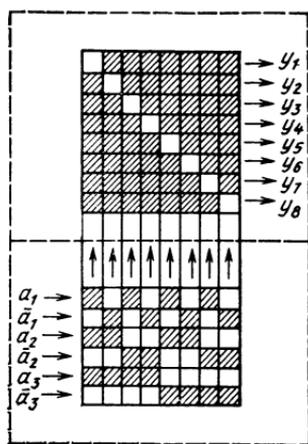


Рис. 45. Операторные поля, осуществляющие операцию дешифрирования на три входа

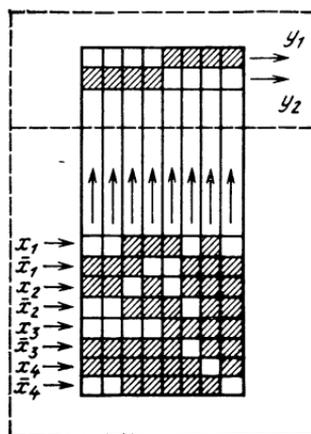


Рис. 46. Операторные поля, реализующие логические функции

реальной физической элемент, поэтому в ЭВМ любая сложная логическая функция реализуется аппаратно, т. е. с помощью некоторого набора логических элементов. Как отмечалось ранее, в оптоэлектронном процессоре возможно образование новых видов выполняемых операций. В качестве примера на рис. 46 показаны операторные поля, реализующие логические функции вида:

$$y_1 = x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 \vee x_1 \bar{x}_2 x_3 \vee x_2 x_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_1 x_3;$$

$$y_2 = \bar{x}_1 x_2 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \vee x_4 \vee x_1 \bar{x}_4.$$

Из рассмотренных примеров ясно, что большинство логических операций вычисляется в оптическом процессоре за один такт. Практически число таких операций не ограничено, и оно определяется лишь объёмом оперативной памяти в том промежутке времени, когда записанные в ней операторные поля не изменяются.

Арифметическое сложение. Все арифметические операции основываются на использовании тех или иных логических функций. Основной арифметической операцией является операция сложения, так как вычитание, умножение и деление в конечном итоге сводятся к этой операции.

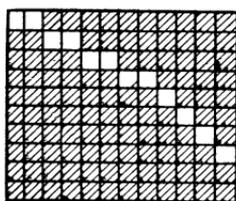
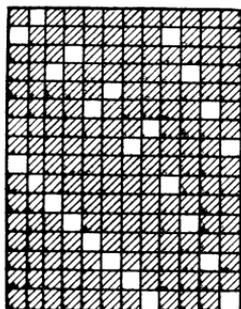
В электронной технике разработано много способов выполнения арифметического сложения и, соответственно, способов построения сумматоров. Существуют параллельные, последовательные, параллельно-последовательные, сверхпараллельные и другие типы сумматоров. Каждый из этих сумматоров выполнен в виде фиксированной электронной схемы, которая не изменяется в процессе работы электронной вычислительной машины.

В оптическом процессоре конкретный вид выполняемых логических операций зависит только от вида управляющих операторов и поэтому арифметическое сложение может выполняться многими способами. Конкретный выбор способа выполнения арифметического сложения диктуется особенностями решаемой задачи. В качестве иллюстрации приведем три способа. Первым рассмотрим наиболее простой способ параллельного сложения двух чисел $A = a_1 a_2 \dots a_n$ и $B = b_1 b_2 \dots b_n$, которое можно выполнить за три такта.

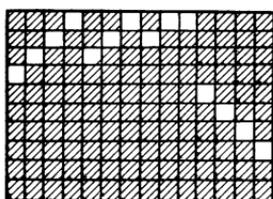
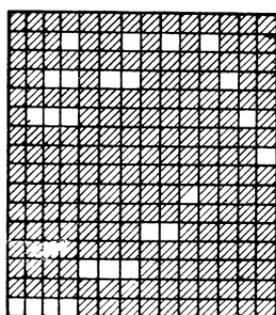
В первом такте вычисляются поразрядные суммы и переносы:

$$g_i = \bar{a}_i b_i \vee a_i \bar{b}_i;$$

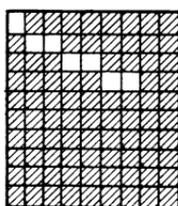
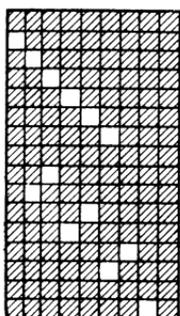
$$P_i = a_i b_i,$$



1-й такт



2-й такт



3-й такт

Рис. 47. Операторные поля для сложения в три такта двух четырехразрядных чисел

где g_i — поразрядная сумма в i -м разряде; P_i — перенос из i -го разряда в $(i+1)$ -й.

Во втором такте вычисляется совокупность истинных переносов

$\psi_i = P_i \sqrt{g_{i+1}} P_{i+1} \sqrt{g_{i+1} g_{i+2}} P_{i+2} \dots \sqrt{g_{i+1} g_{i+2} \dots g_{n-1}} P_{n-1}$,
 а в третьем находится полная сумма ($S = s_1 s_2 \dots s_n$)
 $S_i = g_i \bar{\psi}_i \sqrt{\bar{g}_i} \psi_i$.

На рис. 47 приведены операторные поля в первом, втором и третьем тактах для сложения указанным способом двух четырехразрядных чисел. На рис. 48 представлена зависимость объема операторной памяти от разрядности складываемых чисел для сложения двух чисел за три такта. Из рисунка видно, что для операции сложения чисел с 20 разрядами объем памяти составляет $2 \cdot 10^3$ бит.

Сокращение объема операторной памяти, необходимого для сложения, может быть достигнуто многими методами. Например, складываемые числа можно группировать по m разрядов, а сложение выполнять за четыре такта, т. е. за четыре обращения к операторной памяти. Нетрудно заметить, что этот способ похож на замену параллельного способа сложения последовательно-параллельным с той разницей, что учет переносов из групп выполняется за один такт. В первом такте находятся поразрядные суммы g_i и поразрядные переносы P_i , во втором — истинные переносы внутри групп φ , переносы из группы в группу ψ и признаки групповых переносов ξ , в третьем такте определяются поразрядные суммы внутри групп с учетом истинных внутренних переносов S' и истинные переносы из групп в группы α , в четвертом — окончательная сумма S .

Для иллюстрации в табл. 18 приведены два примера сложения чисел в четыре такта при $m=3$. На рис. 49

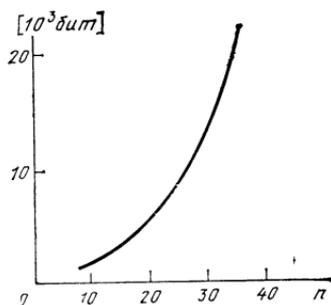


Рис. 48. Зависимость объема операторной памяти от разрядности числа при сложении двух чисел за три такта

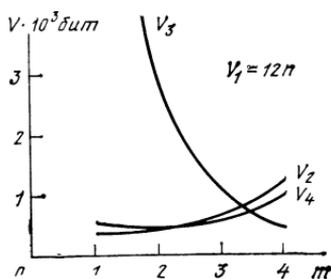


Рис. 49. Зависимость объема памяти операторных полей при сложении чисел на четыре такта от m -числа чисел в группе

Пример арифметического сложения двух чисел в четыре такта

a		$+ \begin{matrix} 111 \\ 010 \end{matrix}$			$\begin{matrix} 001 \\ 111 \end{matrix}$			$\begin{matrix} 101 \\ 101 \end{matrix}$			$\begin{matrix} 111 \\ 000 \end{matrix}$			$\begin{matrix} 111 \\ 000 \end{matrix}$			$\begin{matrix} 111 \\ 007 \end{matrix}$		
q	I такт	101			110			000			111			111			110		
p		100			011			010			000			000			010		
φ	II такт	100			111			010			000			000			110		
ψ		1			1			0			0			0			0		
ξ		0			0			0			0			1			1		
g	III такт	101			110			000			111			111			110		
φ		100			111			010			000			000			110		
S'		001			001			010			111			111			000		
α		1			1			0			0			1			1		
S	IV такт	1			010			001			010			1			0		
		000			000			000			000			000			000		

показана графическая зависимость V_i от m , где V_i — объем памяти операционных полей в i -м такте. Видно, что оптимальное значение m лежит между 3-м и 4-м тактами, при этом $V_i \leq 10^3$ бит.

Смысл третьего способа сложения заключается в использовании большого числа одноразрядных сумматоров, и хотя при этом сложение выполняется за n тактов, где n — разрядность чисел, но большая емкость цифрового оптически управляемого транспаранта позволяет складывать одновременно много пар чисел.

Действительно, для реализации одноразрядного сумматора необходимо вычислять следующие равенства:

$$S_i = \bar{a}_i \bar{b}_i \varphi_i \vee \bar{a}_i \bar{b}_i \varphi_i \vee a_i \bar{b}_i \varphi_i \vee a_i b_i \varphi_i;$$

$$\varphi_{i-1} = a_i b_i \vee a_i \varphi_i \vee b_i \varphi_i,$$

где φ_i — перенос из $i+1$ -го в i -й разряд; S_i — i -й разряд суммы чисел A и B . В данном способе сложения операторное поле не зависит от i , а необходимый объем операторной памяти с учетом парафазного кода составляет $V \approx 40$ бит. Следовательно, на одном транспаранте размером $N \times N$ можно реализовать $K = N \times N / V$ одноразрядных сумматоров. За n тактов складывается K пар чисел, что равносильно одновременному сложению $M = K/n$ чисел. При $N=128$ и $n=32$ $M=10$, т. е. указанный метод эквивалентен одновременному сложению десяти чисел по 32 разряда каждое.

Очевидно, что суть данного способа составляет па-

раллельная обработка, под которой понимается одинаковая обработка элементов большого массива чисел. Однако если задачи требуют сложения лишь пары чисел, то такой способ является нецелесообразным.

Выбор того или иного способа арифметического сложения чисел определяется в каждом конкретном случае классом решаемых задач, но еще раз подчеркнем, что любые операции арифметического сложения производятся при неизменной структуре оптического процессора, а меняется лишь вид управляющих операторов.

Для выполнения арифметического вычитания целесообразно воспользоваться обратным кодом. Причем вычитаемое число B не обязательно переводить в обратный код, а обратный код учесть в операторном поле на первом этапе вычитания, т. е. $g_i = a_i b_i \vee \bar{a}_i \bar{b}_i = a_i b_i \vee \bar{a}_i \bar{b}_i$.

Для умножения можно использовать приемы ускоренного умножения, известные в вычислительной технике. Операцию деления двух чисел в оптическом процессоре можно выполнить на основе только поразрядного вычитания и сдвига.

Приведенные примеры иллюстрируют возможности выполнения на оптоэлектронном процессоре методом управляющих операторов разнообразных логических и арифметических операций. Как было отмечено, число различных операций определяется лишь объемом голографической памяти операторов и может составлять 10^4 при емкости памяти около 10^8 бит. Если некоторые операции требуют меньшего объема операторного поля, чем емкость страницы управляемого транспаранта, то одновременно можно выполнять несколько операций.

Глава III

Некоторые примеры эффективного решения задач на оптоэлектронном матричном процессоре

9. Минимизация логических выражений, поиск вектора в массиве

При конструировании любого блока вычислительной машины, призванного выполнять некоторую группу логических и арифметических операций, особое внимание уделяется проблеме уменьшения объема оборудования. Поскольку выполнение всех логических и арифметических операций основано на булевой алгебре, то ясно, что определяющую роль в решении вышеназванной проблемы играют минимизации тех логических выражений, которые выполняются данным блоком в процессе вычислений.

Любая логическая функция может выражаться различными, но эквивалентными логическими формулами. Многообразие формул, посредством которых может быть выражена любая логическая функция, определяет многообразие способов их записи с помощью разных логических операций. Для практического пользования удобными являются так называемые нормальные формы представления сложных логических функций. При построении этих форм используются рядом понятий, основными из которых являются элементарная конъюнкция и элементарная дизъюнкция.

Элементарной конъюнкцией называется логическое произведение переменных и их отрицаний, например $K = x_1 \bar{x}_2 x_3 \bar{x}_4 x_5$. Чтобы конъюнкция была элементарной, необходимо выполнение условия: каждая переменная в произведении должна встречаться только один раз. Число переменных, составляющих элементарную конъюнкцию, называют ее рангом. При проведении эквивалентных преобразований логических функций часто используют понятия соседних и изолированных конъюнкций. Две конъюнкции одинакового ранга, составленные из одних и тех же переменных, называются соседними, если они отличаются инверсированием только одной переменной. Это означает, что если в одну из них входит j -переменная без знака отрицания, то во вторую эта переменная входит со знаком отрицания. Например, конъюнкция четвертого ранга $K_1^{(4)} = x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ и $K_2^{(4)} = x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4$ являются соседними.

Аналогично понятию элементарной конъюнкции вводится понятие элементарной дизъюнкции. Элементарной дизъюнкцией называется логическая сумма инверсированных или неинверсированных переменных, причем каждая переменная встречается в сумме только один раз. К элементарной относится, например, дизъюнкция $D = x_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \bar{x}_4$.

Основная цель минимизации логических функций — получение их минимальных форм, т. е. форм, содержащих наименьшее число знаков двоичных переменных и их отрицаний, а также знаков логических операций. В процессе минимизации устраняются лишние двоичные переменные. Лишними, или несущественными, двоичными переменными и членами логической формулы называются такие, значения которых не влияют на значение преобразуемой формулы. Так, например, в формуле $x_1 x_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 = x_2 x_3 (x_1 \vee \bar{x}_1) = x_2 x_3 \cdot 1 = x_2 x_3$ лишней двойной переменной оказывается x_1 , так как значение истинности этой формулы зависит от значений только x_2 и x_3 . Действительно, $x_1 x_2 x_3 \vee \bar{x}_1 x_2 x_3 = x_2 x_3 (x_1 \vee \bar{x}_1) = x_2 x_3 \cdot 1 = x_2 x_3$. Рассмотренный пример показывает, что при минимизации целесообразно выявлять соседние конъюнкции, которые «склеиваются», образуя конъюнкцию пониженного ранга.

Таким образом, пусть заданы элементарные конъюнкции вида $K^{(n)} = x_1^{\alpha_1} \bar{x}_2^{\alpha_2} \dots x_i^{\alpha_i} \dots \bar{x}_n^{\alpha_n}$ и затем необходимо вычислить их объединение, т. е. реализовать их дизъюнкцию. Ясно, что при дизъюнкции двух «склеивающихся» конъюнкций происходит уменьшение числа элементов и числа вычисляемых логических выражений. Пусть справочной будет конъюнкция $K_{\alpha_0}^{(n)}$, т. е. все остальные элементарные конъюнкции будем проверять на склеивание с двоичными переменными конъюнкции $K_{\alpha_0}^{(n)}$. Для определения элементарных конъюнкций $K_{\alpha}^{(n)}$ склеивающихся со справочной конъюнкцией по элементу $x_{i_0}^{\alpha_{i_0}}$ инвертируем в справочной конъюнкции все

элементы, кроме $x_{i_0}^{\alpha_0}$. Полученная таким образом конъюнкция параллельно проецируется с помощью цилиндрической линзы на фоточувствительную часть цифрового оптически управляемого транспаранта. На другую поверхность управляемого транспаранта подается операторное поле, каждая строка которого представляет собой элементарную конъюнкцию $K_{\alpha}^{(n)}$. Если $x=1$ соответствует наличие света, а $x=0$ — его отсутствие, то в этой строке оптически управляемого транспаранта, где находится «склеивающаяся» по $x_{i_0}^{\alpha_0}$ конъюнкция, не будет ни одного элемента, который бы отражал свет. Вырабатывая по строчкам признаки

$$P_{\alpha} = \bigvee_{i=1}^n (x_i^{\alpha} \wedge \bar{x}_{i_0}^{\alpha_0}),$$

$$x_i^{\alpha_0} = \begin{cases} \bar{x}_{i_0}^{\alpha_0} & \text{при } i \neq i_0; \\ x_{i_0}^{\alpha_0} & \text{при } i = i_0, \end{cases}$$

можно найти строку, в которой находятся соседние конъюнкции. Оптическая схема поиска соседних конъюнкций представлена на рис. 50.

Если в задаче требуется найти номера строк, где находятся одинаковые со справочной конъюнкции, то в справочной конъюнкции следует инвертировать все элементы без исключения. На цифровом транспаранте с числом элементов $N \times N$ можно поместить $M = N^2/n$ различных элементарных конъюнкций, где n — ранг конъюнкции. Если в ЭВМ решение подобной задачи выполняется с помощью последовательного сравнения справочной конъюнкции $K_{\alpha_0}^{(n)}$ с конъюнкциями, находящимися в памяти, то для сравнения M конъюнкций требуется M тактов, тогда как в оптоэлектронном процессоре сравнение всех конъюнкций производится за один такт. Принимая, что время цикла в ЭВМ и оптоэлектронном процессоре одинаково, получим, что выигрыш в производительности равен количеству различных сравниваемых конъюнкций. При $N=128$ и $n=32$ величина $M=512$. Ясно, что полученная оценка является оценкой сверху.

Рассмотрим теперь случай, когда необходимо проверить M конъюнкций на «склеивание» с каждым из элементов справочной конъюнкции $x_{i_0}^{\alpha_0}$, причем $i=1, \dots, n$. Очевидно, что в оптоэлектронном варианте на это потребуется n тактов. Если в электронном варианте процесс сравнения организован так, что с $x_{i_0}^{\alpha_0}$ сравниваются одновременно одноименные члены $x_{i_0}^{\alpha_0}$, то для сравнения всех элементов всех элементарных конъюнкций потребуется M тактов. Отсюда ясно, что выигрыш в производительности в оптоэлектронном процессоре составит M/n раз. При $N=128$ и $n=32$ выигрыш в производительности 16 раз. Полученная оценка является оценкой снизу. Этот пример показывает, что при минимизации логических выражений в оптоэлектронном процессоре выигрыш в производительности может составить $10-10^2$ по сравнению с электронным вариантом.

Аналогичным образом решается задача о поиске вектора в массиве векторов. Пусть заданы вектор $X = \{x_1 \dots x_i \dots x_n\}$ и матрица $A = \{a_{ij}\}$ размерностью m, n и нужно определить, содержится ли определенный вектор X среди набора векторов, представленных

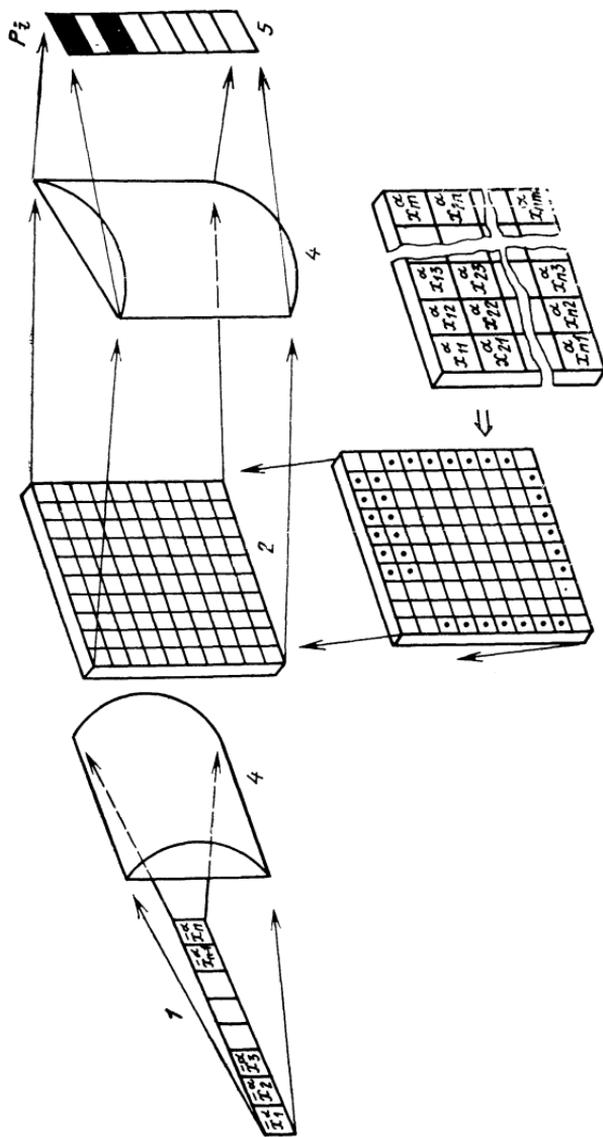


Рис. 50. Оптическая схема поиска соседних конъюнкций:

1 — преобразованная справочная конъюнкция (не инвертирован лишь x_3); 2 — цифровой оптически управляемый транспарант; 3 — операторное поле с массивом конъюнкций; 4 — цилиндрическая линза; 5 — линейка фотодетекторов. Отсутствие света в некоторой ячейке детектора — признак наличия склеивающейся конъюнкции

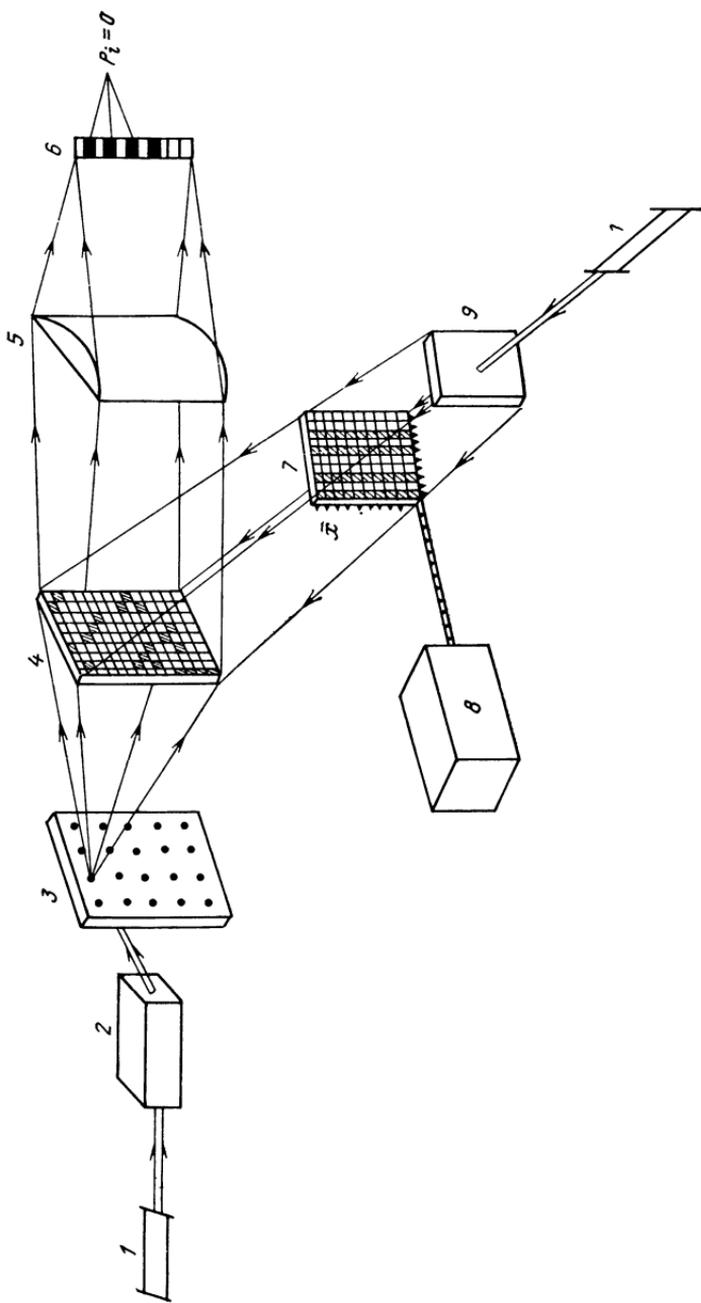


Рис. 51. Оптическая схема поиска вектора в массиве векторов:

1 — лазер; 2 — дефлектор; 3 — матрица голограмм; 4 — цифровой оптически управляемый транспарант; 5 — цилиндрическая линза; 6 — линейка фотоприемников; 7 — электрически управляемый транспарант; 8 — блок электронной памяти; 9 — коллиматор (расширитель луча)

матрицей \bar{A} . Предварительно представим элементы вектора x_i и a_{ij} в парафазном коде.

Алгоритм поиска вектора в массиве векторов основан на вычислении следующего выражения: $F_i = \bigvee_{j=1}^n a_{ij} \bar{x}_j$, где a_{ij} — элементы массива \bar{A} ; \bar{x}_j — инвертированный элемент вектора X ; n — разрядность вектора X ; P_i — признак, по которому определяется существование вектора X в массиве и определяется его адрес, т. е. номер строки в массиве.

Оптическая схема для реализации этой операции представлена на рис. 51. Как и на предыдущей схеме, массив векторов восстанавливается из голографической памяти при обращении лазерного луча в ячейку памяти с определенным адресом. Восстановленный массив векторов проецируется на входную поверхность цифрового оптически управляемого транспаранта. Вектор \bar{X} формируется с помощью быстродействующего электрически управляемого транспаранта, адресуемого параллельно по столбцам в соответствии со значениями \bar{x}_j . Элемент вектора x_j , повторенный столько раз, сколько строк в массиве a_{ij} , т. е. m раз, проецируется на выходную поверхность цифрового оптически управляемого транспаранта. Отражение от каждой клетки этого транспаранта будет только в том случае, если присутствуют сигналы на входной и выходной поверхностях.

Адрес вектора в массиве определяется при фокусировании с помощью цилиндрической линзы результатов умножения $a_{ij} \bar{x}_j$, т. е. выполнения операции $\bigvee_{i=1}^n a_{ij} \bar{x}_j$, на линейку фотоприемников. Отсутствие света на i -м элементе этой линейки соответствует $P_i = 0$ и означает, что i -я строка матрицы \bar{A} содержит вектор, равный искомому x_j .

10. Расширение списка операций для вычислений логических выражений

Вычислительные процессы отличаются большим разнообразием как по существу решаемых задач, так и по алгоритмам их решения. Существуют задачи, приводящие к необходимости решения логических, а не алгебраических уравнений. Под логическими уравнениями понимают уравнения, в которых постоянные и переменные величины могут принимать лишь два значения: 0 или 1, а действия над ними определяются алгеброй, которая опирается на некоторый, произвольный базис логических операций. В качестве одного из них можно принять следующий базис:

1. Операция отрицания («НЕ»).
2. Операция умножения (\wedge):
3. Операция «сложения по модулю 2» (\oplus):

Из таблиц видно, что такая алгебра весьма схожа с

Таблица 19

\bar{x}	0	1
x	1	0

Таблица 20

x_1	0	0	1	1
x_2	0	1	0	1
$x_1 \wedge x_2$	0	0	0	1

Таблица 21

x_1	0	0	1	1
x_2	0	1	0	1
$x_1 \oplus x_2$	0	1	1	0

булевой с той лишь разницей, что логическое сложение— дизъюнкция заменяется сложением по модулю 2.

Остальные же операции идентичны операциям булевой алгебры.

Для решения логических уравнений применяют как универсальные цифровые ЭВМ, так и специализированные вычислительные устройства. Специализированные вычислительные устройства обладают более высокой производительностью, чем универсальные ЭВМ, но решают сравнительно узкий круг задач.

Как было отмечено в § 6, 7, в оптоэлектронном процессоре с управляющими операторами возможно решение широкого класса задач при неизменной структуре процессора, так как в соответствии с решаемой задачей изменяется лишь вид управляющих операторов.

Решение логических уравнений на оптоэлектронном процессоре может дать ощутимый выигрыш по сравнению с ЭВМ по причинам, связанным с особенностью логических уравнений. Эти особенности заключаются в том, что при решении логических уравнений возможна высокая степень распараллеливания операций, а также в том, что при выполнении логических операций не возникают переносы из разряда в разряд. Поскольку в логических уравнениях отдельные разряды обрабатываются независимо, то свойственная оптике высокая параллельность обработки позволяет надеяться на разработку весьма эффективных методов решения задач алгебры логики.

Очевидно, что, для того чтобы на оптоэлектронном процессоре можно было бы одинаково эффективно ре-

шать как арифметические, так и логические задачи, необходимо расширить список элементарных логических операций, выполняемых методом управляющих операторов. Для рассмотренных ранее методов выполнения основных элементарных логических операций, таких как логическое умножение, сложение, сложение по модулю 2 и т. д. приводились свои оптические схемы, причем в одних случаях для представления информации использовался парафазный код, а в других — обычный. Такой путь приводил к некоторому усложнению оптической схемы. Если перейти к парафазному представлению для всех переменных, участвующих в вычислительном процессе, то метод управляющих операторов позволяет единым образом вычислять функции типа $F = \bigvee_{i=1}^n x_i^{\alpha}$, где x_i^{α} равен либо x_i , либо \bar{x}_i , а \bigvee — знак логической суммы.

На рис. 52 для двух переменных x_1 и x_2 показаны операторные поля для вычисления всех возможных функций вида $F = x_1^{\alpha} \bigvee x_2^{\alpha}$. На управляющую поверхность цифрового транспаранта подается дискретная световая картина — оператор, а на управляемую поверхность — двоичные переменные в парафазном представлении. Вид операторов однозначно определяет вид дизъ-

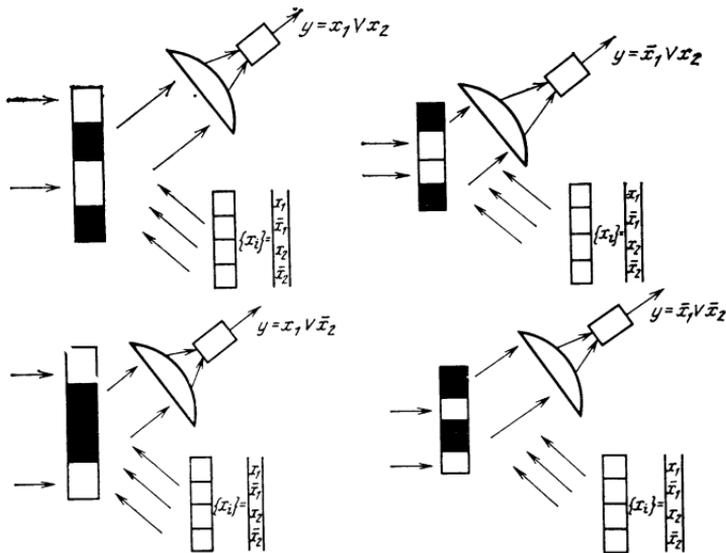


Рис. 52. Виды операторных полей для вычисления всех возможных функций вида $y = x_1^{\alpha} \bigvee x_2^{\alpha}$

юнкции над переменными. Цилиндрическая линза собирает отраженную от транспаранта результирующую картину. Наличие света в фокусе цилиндрической линзы означает, что дизъюнкция равна 1, а отсутствие света — 0. Из рисунка ясно, какие операторы необходимы для получения выражений $x_1 \vee x_2$, $\bar{x}_1 \vee x_2$, $x_1 \vee \bar{x}_2$, $\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$. В приведенных примерах отраженный от ячейки транспаранта свет будет только в том случае, когда есть и управляющий свет, и считывающий.

На рис. 53 изображена принципиальная схема оптоэлектронного вычислительного устройства, выполняющего расширенный базис логических операций. Излучение лазера с помощью дефлектора отклоняется на определенную ячейку памяти — голограмму. Восстановленное с голограммы изображение, являющееся управляющим оператором, проецируется на входную поверхность оптического цифрового транспаранта. Переменные, подлежащие обработке, из электронной памяти поступают на электрически управляемый цифровой транспарант, выполняющий функцию формирования страницы переменных. Поскольку переменные должны быть представлены в парафазном коде, то первые две строки электрически управляемого транспаранта заполняются первой строкой первого массива, следующие две строки — первой строкой второго массива и затем все повторяется для следующих строк массивов обрабатываемых чисел. Отраженный от цифрового оптически управляемого транспаранта свет собирается матрицей линз и проецируется либо на входную поверхность транспаранта следующего каскада обработки информации, либо на матрицу фотоприемников. В большинстве случаев результат вычислений с первого транспаранта должен одновременно подаваться как на вход последующего каскада обработки, так и на вход матрицы фотоприемников, которая, например, может быть использована для контроля правильности вычислений или коррекции ошибок. Считанный в электрическом виде сигнал с фотоприемников вновь поступает в блок электронной памяти, где он может храниться, выводиться на другие устройства или снова подаваться из памяти в блоки обработки информации по командам блока управления.

Рассмотрим некоторые примеры выполнения логических операций над двумя массивами чисел в оптоэлектронном процессоре с расширенным базисом логических операций.

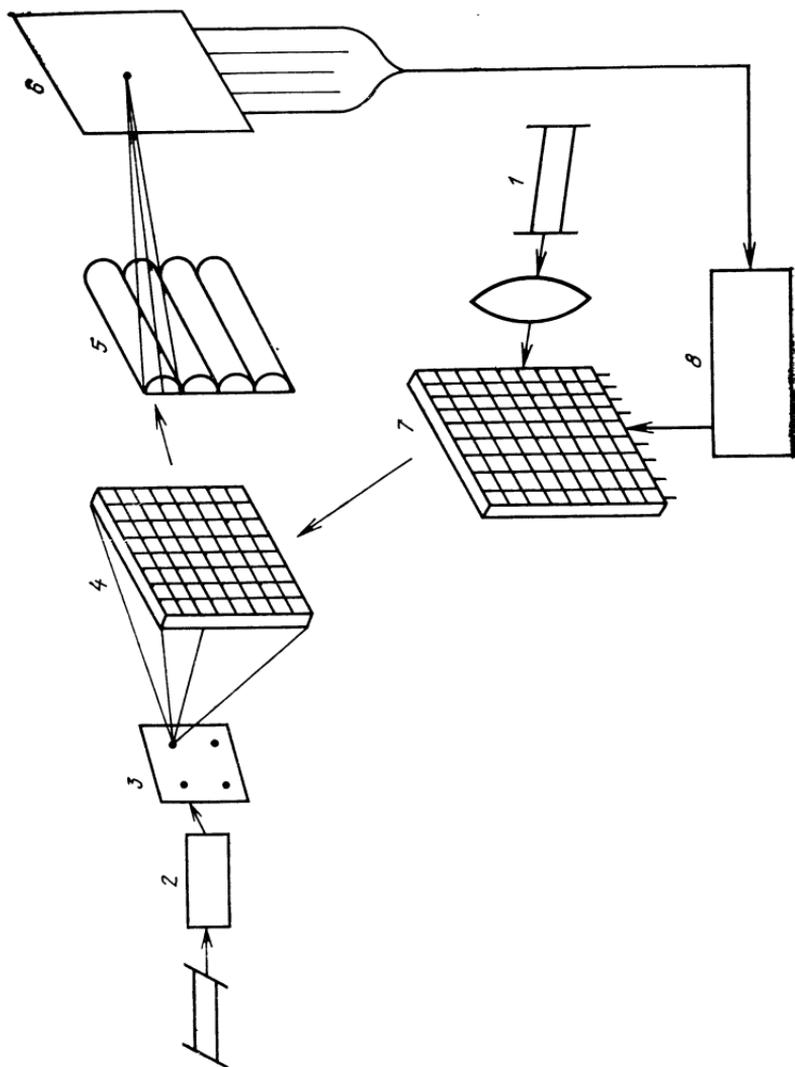


Рис. 53. Принципиальная схема оптоэлектронного вычислительного устройства, выполняющего расширенный базис логических операций:

1 — лазер; 2 — дефлектор; 3 — матрица голограмм; 4 — оптически управляемый цифровой транспарант; 5 — матрица цилиндрических линз; 6 — матрица фотопроекторов; 7 — электрически управляемый транспарант; 8 — блок электронной памяти

1. Отрицание матрицы. Пусть дана бинарная матрица $M_1 = \{a_{ij}\}$ и требуется определить новую матрицу M , каждый элемент которой является отрицанием элементов матрицы M_1 , т. е. необходимо найти матрицу $M = \widehat{M}_1 = \{\bar{a}_{ij}\}$. Заметим, что $\bar{a}_{ij} = \bar{a}_{ij} \vee 0$, следовательно, для реализации отрицания необходимо вычислить дизъюнкцию матрицы M_1 с нулевой матрицей. Операторное поле для вычисления дизъюнкции $\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2$ показано на рис. 52, а нулевая матрица должна храниться в памяти.

2. Логическое умножение матриц. Для побитового логического умножения двух матриц $M_1 = \{a_{ij}\}$ и $M_2 = \{b_{ij}\}$ необходимо вычислить матрицу M_3 , каждый элемент которой является конъюнкцией одноименных элементов матриц M_1 и M_2 , т. е. необходимо вычислить матрицу $M_3 = \{c_{ij}\} = \{a_{ij} \wedge b_{ij}\}$. Логическое умножение $c_{ij} = a_{ij} \wedge b_{ij}$ можно представить и как $c_{ij} = \bar{a}_{ij} \vee \bar{b}_{ij}$, и отсюда ясно, что значения c_{ij} можно вычислить в два такта: в первом такте вычисляется $\bar{a}_{ij} \vee \bar{b}_{ij}$, а во втором — производится отрицание найденного массива.

3. Импликация двух матриц. Поскольку импликация $a_{ij} \rightarrow b_{ij} = \bar{a}_{ij} \vee b_{ij}$, то эта операция реализуется за один такт, а операторное поле, реализующее импликацию двух элементов, показано на рис. 52. Матрица $M_3 = M_1 \rightarrow M_2$ получается при проецировании на входную поверхность оптически управляемого транспаранта матрицы операторов, каждый из которых соответствует импликации двух элементов a_{ij} и b_{ij} .

4. Эквиваленция двух матриц (операция равнозначности). Функция эквиваленции двух переменных определяется таким образом: $c_{ij} = a_{ij} \approx b_{ij}$. Для определения функции равнозначности двух матриц воспользуемся тем, что $c_{ij} = a_{ij} b_{ij} \vee \bar{a}_{ij} \bar{b}_{ij}$. Обозначим $y_{ij} = a_{ij} \vee b_{ij}$, а $z_{ij} = \bar{a}_{ij} \vee \bar{b}_{ij}$, тогда можно записать, что $c_{ij} = \bar{y}_{ij} \vee \bar{z}_{ij}$. Действительно, $\bar{y}_{ij} \vee \bar{z}_{ij} = \overline{(a_{ij} \vee b_{ij})} \vee \overline{(\bar{a}_{ij} \vee \bar{b}_{ij})} = \bar{a}_{ij} \wedge \bar{b}_{ij} \vee a_{ij} \wedge b_{ij} = c_{ij}$. Таким образом, эквиваленцию двух матриц можно вычислить за три такта: в первом находят дизъюнкцию y_{ij} , во втором — дизъюнкции z_{ij} , а в третьем — матрицу $M_3 = M_1 \approx M_2$.

5. Сложение по модулю 2 двух матриц. Операцию сложения по модулю 2 можно представить в виде $c_{ij} = a_{ij} \oplus b_{ij} = \bar{a}_{ij} b_{ij} \vee a_{ij} \bar{b}_{ij} = (a_{ij} \vee b_{ij}) \vee (\bar{a}_{ij} \vee \bar{b}_{ij})$. Таким образом, если в первом такте вычислить логическую сумму $y_{ij} = a_{ij} \vee b_{ij}$, а во втором — логическую сумму $z_{ij} =$

В том случае, если в j -м столбце матрицы A имеются нулевые элементы, то в матрице C_j под соответствующими номерами появляются нулевые строки. Этим фактически и различаются матрицы B_j и C_j .

Если далее провести поэлементное сложение по модулю 2 n матриц C_j ($j=1, 2, \dots, n$), т. е. вычислить за n тактов новую

матрицу $\hat{G} = \sum_{j=1}^{\oplus n} \hat{C}_j$, то каждый столбец этой матрицы будет со-

стоять из элементов вектора G_k в соответствии с тем, что

$g_i^k = \sum_{j=1}^{\oplus n} a_{ij} x_j^k$. Поскольку на оптоэлектронном процессоре за

один такт возможно производить формирование массивов B_j , C_j и сложение по модулю 2 матриц C_j и C_{j+1} , то на вычисление векторов G^k затрачивается n тактов. Таким образом, можно считать, что логическое умножение матрицы на вектор эффективно производится за один такт.

Легко видеть, что при фиксированных размерностях матрицы и векторов увеличение информационной емкости поля, т. е. размерности цифровых оптически управляемых транспарантов позволяет увеличивать производительность вычислений. Например, при размерности матрицы A , равной $n \times n$, и емкости транспаранта $2n \times 2n$ элементов вычисления можно производить сразу с $4n$ векторами — четыре группы по n векторов. При этом каждый из n массивов B_j будет состоять из четырех подмассивов, каждый из которых содержит n одинаковых строк, сформированных из одноименных разрядов n векторов одной из четырех групп. Матрица C_j получается в результате конъюнкции j -го столбца матрицы на все четыре подмассива, составляющие B_j . Далее следует n тактов поэлементного сложения по модулю 2 последовательности из n картин C_j . На вычисление $4n$ векторов требуется n тактов, на вычисление одного вектора приходится эффективно $1/4$ такта. В общем случае при размерности матрицы и вектора, равной n , и при фиксированной емкости информационного поля $N^2 = Ln \times Ln$, где L — целое число, эффективная часть такта, приходящаяся на вычисление одного вектора, составляет

$$m = \frac{\text{число вычислительных тактов в цикле}}{\text{число вычисляемых в цикле векторов}} = \frac{1}{L^2} \leq 1.$$

Величина m^{-1} , умноженная на тактовую частоту f_T , дает производительность вычислений P , т. е. $P = L^2 f_T$ операций/с, а скорость обработки информации V составит $V = L^2 n f_T$ бит/с. Если принять размерность векторов и матриц $n=32$, то при емкости поля управляемого транспаранта $N^2 = 128 \times 128$ элементов и тактовой частоте $f_T = 10$ МГц производительность вычислений составит $P \approx 1,6 \cdot 10^8$ операций/с, а скорость обработки $V \approx 5 \cdot 10^9$ бит/с. Если же $n=16$, то $P \approx 6,4 \cdot 10^8$ операций/с, а $V \approx 10^{10}$ бит/с.

Вычисление результата умножения матрицы на вектор в оптоэлектронном процессоре может быть организовано различными способами в зависимости от состава оборудования, входящего в оптоэлектронный процессор, а также методов вычисления операций конъюнкции и сложения по модулю 2.

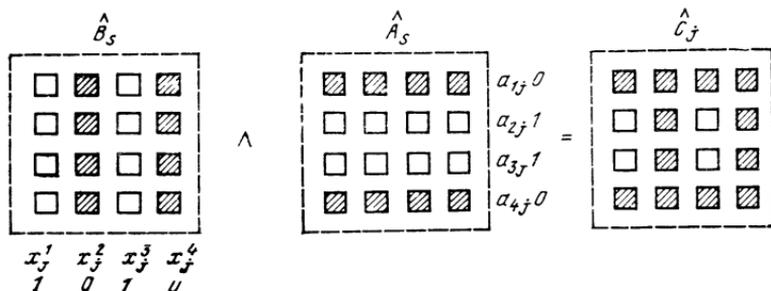


Рис. 54. Схематическое изображение вычисления конъюнкций матриц \hat{A}_j и B_j (единицы представлены светлыми квадратиками, нули — темными)

Например, матрица C_j может быть вычислена как конъюнкция двух матриц B_j и A_j , где матрица A_j составлена из n повторяющихся столбцов $a_{ij} (i=1 \dots n)$ при фиксированном j . На рис. 54 схематически показаны входные переменные — матрицы B_j и A_j и матрица $C_j = B_j \wedge A_j$.

Результирующая картина — матрица C — получается за n тактов при поэлементном сложении по модулю 2 матриц C_j . Последовательное сложение по модулю 2 многих картин может быть выполнено, например, с помощью двух цифровых оптически управляемых транспарантов, один из которых проводит необходимую логическую операцию над двумя картинками $C_j \oplus C_{j+1}$, а второй используется как оперативная оптическая память для хранения результата промежуточного вычисления $C_j \oplus C_{j+1}$. В следующем такте вычислений матрица C_{j+2} складывается с результатом, хранящимся в памяти. На рис. 55 показана схема последовательного сложения матриц C_j с помощью второго цифрового оптического транспаранта, выполняющего функции оптической оперативной памяти.

При решении вопроса о том, насколько оптоэлектронный вариант выполнения умножения матрицы на вектор более производителен, чем электронный, следует учесть, что традиционная элементная база современной вычислительной техники позволяет распараллеливать вычисления на 10^4 каналов. Однако такое число каналов может быть реализовано лишь путем использования большого числа (до 100) отдельных устройств, каждое из которых будет содержать тысячи логических элементов. Во-первых, такой электронный вычислитель неизбежно будет специализированным.

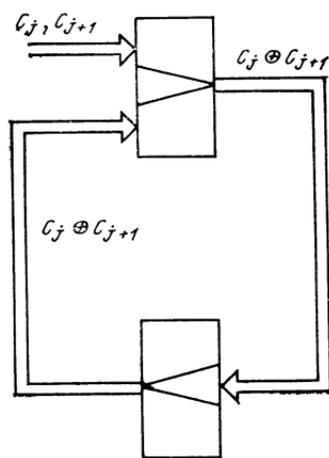


Рис. 55. Схема последовательного сложения по модулю 2 двух матриц с помощью двух цифровых оптически управляемых транспарантов

а во-вторых, столь высокий уровень распараллеливания по устройствам представляется близким к предельному, тогда как в оптоэлектронном варианте возможно дальнейшее увеличение параллельности вычислений за счет использования большого числа транспарантов. Основное же достоинство оптоэлектронного процессора с управляющими операторами заключается в том, что такой процессор является универсальным, так как тип решаемых задач определяется лишь видом управляющих операторов при неизменной структуре процессора.

Глава IV

Структурная организация оптоэлектронных матричных процессоров

12. Функциональная структура оптоэлектронного процессора с управляющими операторами

К оптоэлектронному процессору с управляющими операторами можно предъявить следующие требования, вытекающие из современного состояния и перспектив развития вычислительной техники: высокая параллельность, т. е. возможность цифровой обработки двумерных массивов информации объемом от 32×32 до 128×128 дискретных бинарных элементов; быстроедействие при выполнении операции над массивом — не менее 10^{-7} с; экономичность по потребляемой энергии не хуже, чем на уровне разрабатываемых блоков ЭВМ; длительный срок службы.

Кроме того, при разработке оптоэлектронного процессора необходимо обеспечить сохранение таких его достоинств, как возможность использования большого числа (до 10^3 — 10^4) базисных операторов, приводящая к гораздо большей по сравнению с ЭВМ производительности при одинаковом быстроедействии элементов; возможность изменения базисных операторов в процессе счета, обеспечивающая переменную функциональную структуру процессора.

Учитывая вышесказанное, оптоэлектронный процессор с управляющими операторами может иметь функциональную структуру, показанную на рис. 56. Блок управляемых пучков света (БУПС) предназначен для формирования пучков света с заданным адресом. Он состоит из лазера, дефлектора, электронного блока управления ими и оптической схемы, обычно применяемой в устройствах голографической записи информации.

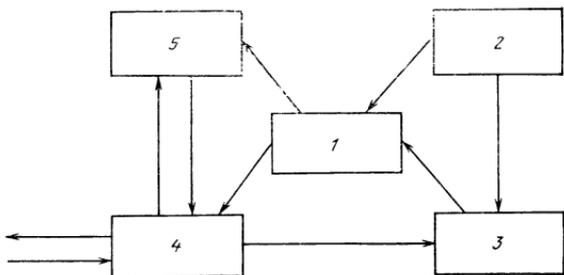


Рис. 56. Функциональная структура оптоэлектронного процессора с управляющими операторами:

1 — блок носителей информации; 2 — блок управляемых пучков света; 3 — блок записи голограмм; 4 — блок буферной памяти; 5 — блок оптически управляемых транспарантов

Блок записи голограмм (БЗГ) предназначен для формирования страниц информации, включающих в себя базисные операторы, части программ и другие числовые массивы, а также для оптической записи этой информации в виде Фурье-голограмм на некоторой среде — носителе информации. Блок состоит из формирователя страниц информации — цифрового транспаранта адресуемого оптически или электрически, и соответствующего оптического устройства. Считывание информации с транспаранта и запись ее в виде голограмм в блоке носителя информации (БН И), а также стирание и перезапись голограмм в процессе работы процессора осуществляются с помощью указанного выше БУПС. Таким образом, в совокупности БУПС, БЗГ и БНИ напоминают собой известные оптические запоминающие устройства голографического типа с частичной перезаписью информации (полупостоянное запоминающее устройство), выполняющие функции долговременного хранения операторных полей, программ и числовых массивов в виде двумерных картин.

Блок буферной памяти (ББП) предназначен для хранения и оперативной перезаписи промежуточных результатов вычислений.

Блок оптически управляемых транспарантов (БОУТ) предназначен для оптической обработки числовых картин. Он состоит из нескольких оптически связанных между собой быстродействующих цифровых транспарантов с оптическим управлением. Блок включает в себя ряд оптических элементов, лазеры и оптически управляемые цифровые транспаранты, что позволяет осуществ

лять логические преобразования информации и производить усиление яркости изображений.

Функциональные связи рассмотренных блоков оптоэлектронного процессора показаны на рис. 56 стрелками. Алгоритмы выполнения операций определяются управляющими операторами, находящимися в БНИ. Операторы предварительно формируются управляемым транспарантом БЗГ и с помощью БУПС, в виде голограмм записываются на участках БНИ по адресам, вводимым в БЗГ извне. При решении разнообразных задач эти операторы могут быть изменены и дополнены.

При обработке цифровой информации оптоэлектронный процессор может одновременно работать в трех режимах, ввод, обработка и вывод информации. При вводе данных входная информация, например, управляющие операторы, программа обработки с помощью программы ввода, хранимой в БНИ, через ББП и БЗГ заносится в БНИ. При обработке информации числовые картины по соответствующим программам обрабатываются в БОУТ, причем результаты промежуточных вычислений поступают в ББП. При необходимости некоторые результаты могут быть записаны в БНИ. Например, в процессе вычислений можно получить новые управляющие операторы или изменить старые. Поскольку вид оператора определяет характер выполняемой операции, то это означает, что во время работы процессора на логическом уровне могут быть образованы новые виды выполняемых операций, т. е. возможно изменение структуры вычислений. Этим качеством оптоэлектронного процессора не обладают ЭВМ.

В режиме вывода информации по программе вывода результаты вычислений, хранимые в БНИ и ББП, подаются на внешние устройства.

13. Структура связей оптоэлектронного процессора с электронными вычислительными машинами

Обработка в оптоэлектронном процессоре цифровых картин позволяет сделать существенный шаг в развитии структуры цифровых вычислительных машин. Современные вычислительные машины предназначаются главным образом для выполнения операций над двоичными многогоразрядными числами. В электронных вычислительных машинах заранее учитываются смысловые связи между информацией, которую несет каждый из двоичных раз-

рядов. Создание вычислительной машины, оперирующей двумерными цифровыми картинками, позволяет учесть более глубокие смысловые связи в информации, чем связи, учитываемые обычно в современных машинах. Становится возможным учитывать связи не только между отдельными разрядами одного числа, но и между отдельными числами, представляющими собой значения одной функции.

Оптоэлектронный процессор с управляющими операторами содержит ряд голографических постоянных запоминающих устройств, в которых хранится набор операторов. Управляющие операторы считываются из постоянной памяти и поступают на управляющую поверхность оптически управляемого транспаранта, задавая тем самым вид операции, выполняемой в оптическом канале обработки информации. Количество выполняемых операций определяется объемом запоминающего устройства и может быть достаточно велико. Следует отметить, что структура оптического канала может зависеть от того, для какого класса задач предназначен данный канал.

Наиболее высокая производительность в оптоэлектронном процессоре может быть достигнута при достаточно однородной обработке больших массивов информации. В оптическом канале трудно и невыгодно выполнять сложные и разнообразные преобразования малых объемов управляющей информации, например обрабатывать команды выполняемых программ. Современные ЭВМ наилучшим образом приспособлены для этой цели. В связи с этим целесообразно однородную обработку больших массивов информации производить в оптоэлектронном процессоре, а функции управления работой процессора и выполнение операций над результатами обработки информации выполнять на ЭВМ, т. е. полностью разделить поток данных и поток команд.

В настоящее время достаточно хорошо разработана техника постоянных голографических запоминающих устройств, тогда как среды для оптических оперативных запоминающих устройств, допускающих быструю запись и смену информации, отсутствуют. В связи с этим в оптоэлектронных процессорах целесообразно использование двухуровневой системы полупроводниковых широкоформатных запоминающих устройств. Электронные запоминающие устройства через ряд преобразователей электрических сигналов в оптические и оптических в электрические связаны с оптическим каналом обработки

информации. Преобразователи осуществляют преобразование не только вида носителя информации (электрических сигналов в оптические, и наоборот), но и формы ее представления — одномерной в двумерную, и наоборот. Эти преобразования сигналов выполняются с помощью электрически управляемых цифровых транспарантов и матриц фотоприемников. Использование ЭВМ для управления оптоэлектронным процессором и полупроводниковой памяти в качестве оперативного запоминающего устройства позволяет преодолеть существующие сейчас трудности структурными методами.

На рис. 57 представлена структурная схема гибридного оптоэлектронного процессора, в состав которого входят оптоэлектронный тракт обработки больших массивов информации и универсальная ЭВМ.

Для того чтобы производительность вычислений оптоэлектронного процессора не ограничивалась пропускной способностью вводных и выводных устройств, в данном случае преобразования электрических сигналов в двумерные картины и наоборот, в состав структурной схемы введены коммутатор (КЦК) и разветвитель (РЦК) цифровых картин. Коммутатор цифровых картин, по существу, представляет собой схему ИЛИ, реализующую эту логическую операцию над цифровыми картинками, сформированными в преобразователе электрических сигналов в оптические. Разветвитель цифровых картин выполняет аналогичную функцию при преобразовании цифровой оптической картины в электрические сигналы. Коммутатор и разветвитель цифровых картин могут быть выполнены с помощью волоконной оптики.

На рис. 58 представлен оптический канал обработки информации гибридного оптоэлектронного процессора с управляющими операторами. В состав оптического канала входят голографические постоянные запоминающие устройства, в которых хранится информация с цифровыми картинками управляющих операторов, цифровые оптически управляемые транспаранты и многоканальный коммутатор цифровых картин. Логическая и арифметическая обработка информации производится в блоке оптически управляемых транспарантов (БОУТ), в котором происходит совмещение цифровой картины, содержащей исходную информацию с цифровыми картинками управляющих операторов. Многоканальный коммутатор цифровых картин обеспечивает выполнение логических опе-

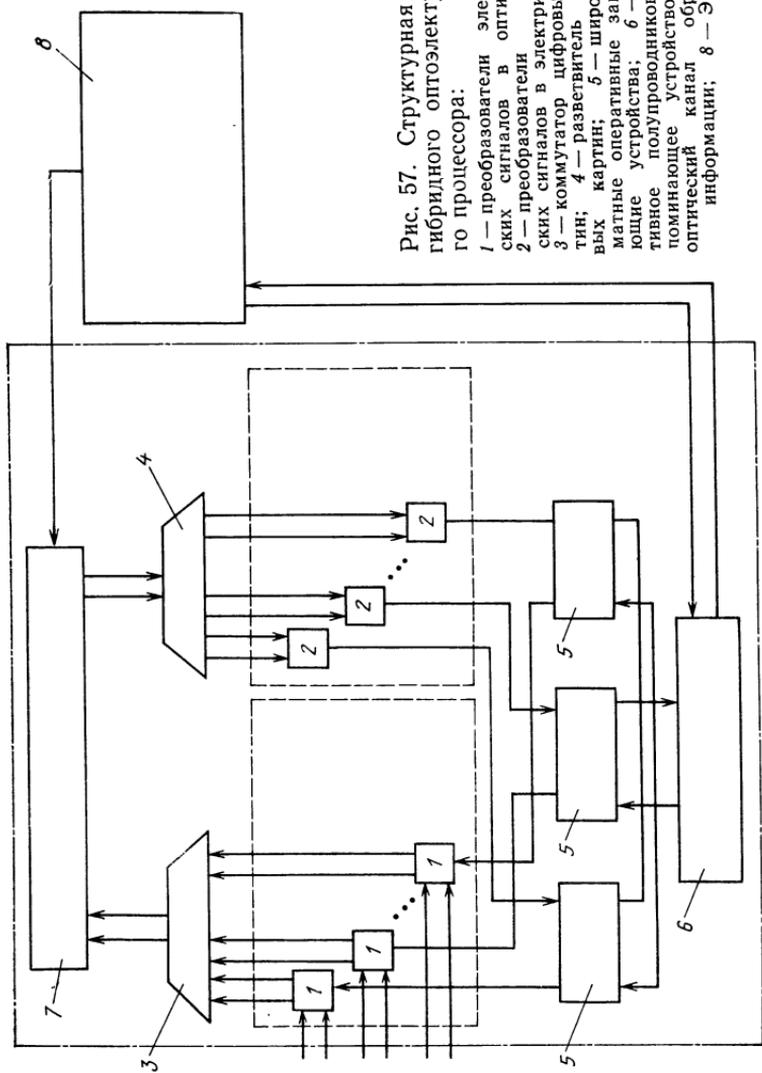


Рис. 57. Структурная схема гибридного оптоэлектронного процессора:

- 1 — преобразователи электрических сигналов в оптические;
- 2 — преобразователи оптических сигналов в электрические;
- 3 — коммутатор цифровых картин;
- 4 — разветвитель цифровых картин;
- 5 — широкоформатные оперативные запоминающие устройства;
- 6 — операционное полупроводниковое запоминающее устройство;
- 7 — оптический канал обработки информации;
- 8 — ЭВМ

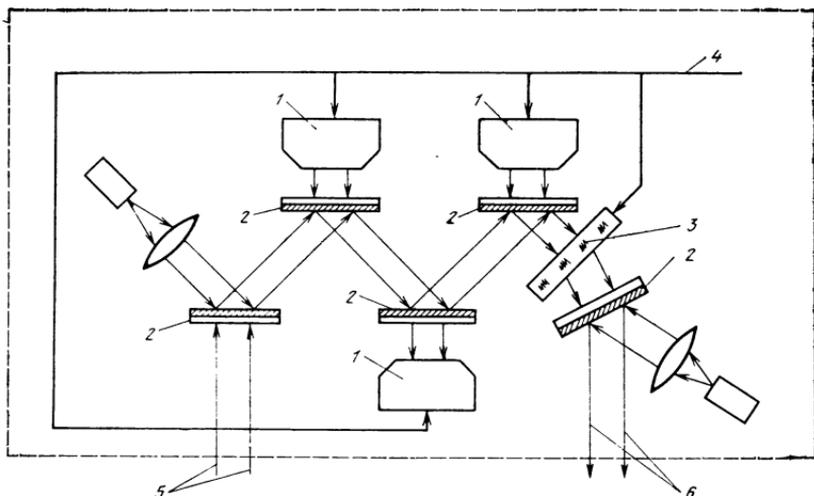


Рис. 58. Оптический канал обработки информации гибридного оптоэлектронного процессора с управляющими операторами:

1 — голографическая память операторов; 2 — цифровые оптические управляемые транспаранты; 3 — многоканальный коммутатор цифровых картин; 4 — сигналы управления из ЭВМ; 5 — информация из коммутатора цифровых картин; 6 — результат в коммутатор цифровых картин

раций И, ИЛИ над элементами результирующей цифровой картины.

В зависимости от того, насколько широк должен быть класс логических операций, выполняемых оптоэлектронным процессором, он может содержать больше или меньше цифровых оптических управляемых транспарантов и блоков голографических запоминающих устройств. Для вычисления, например, логических функций достаточно одного управляемого транспаранта, а для выполнения арифметических операций минимальное число транспарантов — три. В схеме, изображенной на рис. 58, первый транспарант выполняет функции усилителя цифровых картин, пятый — усиливает выходные оптические сигналы, собственно обработка производится вторым, третьим и четвертым транспарантами.

14. Оценка производительности матричного оптоэлектронного процессора

Оценку производительности оптоэлектронного процессора можно произвести следующим образом. Преобразование информации в БОУТ происходит за время $T_0 = kT_t + T_l$, где T_t — время переключения одного циф-

рового транспаранта; k — число последовательно расположенных транспарантов, необходимых для выполнения заданной группы операций; T_l — время распространения света в БОУТ. В примере, представленном на рис. 58, $1 \leq k \leq 5$.

За время T_0 в БОУТ может быть преобразован объем информации $V = m \times m / \kappa_p = m^2 / \kappa_p$ бит, где m — длина строки и столбца транспаранта; κ_p — коэффициент «разбухания», учитывающий избыточность представления информации при обработке ее методом управляющих операторов ($\kappa_p \geq 1$). Пропускная способность БОУТ составит $P_0 = V / T_0 = m^2 / \kappa_p T_0$ бит/с. Производительность P оптоэлектронного процессора, содержащего L каналов оптической обработки информации, в каждом из которых ведется параллельная обработка n -разрядных чисел, а число чисел равно r , можно оценить следующим образом: $P = L P_0 / 2n = L r / 2 \kappa_p T_0 = L m^2 / 2 n \kappa_p T_0$ операций/с, где $n = m^2 / r$ бит. Здесь для удобства сравнения с ЭВМ учтено, что в ЭВМ, как правило, производится оовместное преобразование двух операндов.

Для обеспечения требуемой производительности P в гибридном оптоэлектронном процессоре должно быть N_{eo} преобразователей электрических сигналов в оптические: $N_{eo} = L P_0 / P_{eo}$, где P_{eo} — пропускная способность преобразователя электрических сигналов в оптические. Число же преобразователей оптических сигналов в электрические должно составлять $N_{oe} = L P_0 / P_{oe}$, где P_{oe} — пропускная способность преобразователя оптических сигналов в электрические.

Очевидно, что $P_{oe} = \kappa_c P_{eo}$, где κ_c — коэффициент сжатия (уменьшения) объема информации в результате обработки ее в БОУТ ($0 < \kappa_c \leq 1$). Значение пропускной способности P_0 БОУТ, с одной стороны, определяется требованиями к производительности P оптоэлектронного процессора, а с другой — ограничивается характеристиками элементов, т. е. цифровых оптических управляемых транспарантов, фотоприемных матриц и т. д. Однако если учесть, что цифровые транспаранты могут обладать возможностями запоминания, то легко понять, что в БОУТ можно организовать конвейерную обработку информации. При таком способе обработки новый результат будет появляться на выходе БОУТ через время, равное времени срабатывания одного транспаранта, хотя суммарное время получения результата будет зависеть от числа последовательно расположенных транс-

парантов в БОУТ. Таким образом, в установившемся режиме пропускная способность БОУТ будет определяться только значением T_l . При длине оптического пути в БОУТ, равной 1 м, $T_l \approx 0,3 \cdot 10^{-8}$ с. Если принять скорость переключения быстродействующего цифрового оптически управляемого транспаранта равной 10 МГц, то $T_0 = 10^{-7}$ с. При выполнении арифметических операций методом управляющих операторов в БОУТ, содержащих не менее трех транспарантов, максимальное значение $\kappa_p = 17$. Приняв среднее для многих операций $\kappa_p = 10$ для транспаранта размером $m^2 = 128 \times 128$, из (3) получим, что $P_0 \approx 1,6 \cdot 10^{10}$ бит/с. Производительность одного оптического канала обработки информации, определяемая из (4), при $L = 1$ и $n = 32$ составляет $P = 2,5 \cdot 10^8$ операций/с. При решении различных задач производительность P одного канала может изменяться от $P_1 = 2,5 \cdot 10^9$ операций/с для логических задач, в которых избыточность представления входной информации минимальна, до $P_2 = 1,5 \cdot 10^8$ операций/с (для задач с максимальной избыточностью представления входных данных).

С возрастанием числа оптических каналов обработки информации, а также числа элементов в управляемом транспаранте, возрастает производительность оптоэлектронного процессора в целом. Число оптических каналов обработки информации зависит от объема входного потока информации, перечня операций, выполняемых при ее обработке, требуемой производительности оптоэлектронного процессора, количества одновременно обрабатываемых объектов, образующих входной массив информации. Кроме того, число оптических каналов зависит от возможностей управления их работой и обменом информацией с ЭВМ, используемой совместно с оптоэлектронным процессором. Управляемые транспаранты с числом элементов $10^5 - 10^6$ могут строиться из отдельных модулей, содержащих, например, 32×32 элемента. Таким образом, может быть получена производительность, превышающая 10^{10} операций/с.

Если число оптических каналов обработки информации велико ($L > 4$), то их совокупность можно рассматривать как многопроцессорную оптоэлектронную вычислительную систему с общим управлением, отличающуюся следующими особенностями: универсальность, сочетающаяся с высокой эффективностью при решении задач разных классов; возможность

широкого применения параллелизма в обработке информации; способность образовывать новые виды выполняемых операций на логическом уровне в ходе вычислительного процесса; способность изменять структуру вычислений во время работы процессора; естественная приспособленность как к матричной, так и магистральной обработке информации.

Список литературы

1. Гутер Р. С., Полунов Ю. Д. Математические машины. — М.: Просвещение, 1975.—287 с.
2. Лаврищев В. П., Свидзинский К. К. Проблемы построения оптоэлектронных систем обработки информации. — Микроэлектроника, 1973, т. 2, вып. 1, с. 16.
3. Фотоника. Под ред. М. Балкански. — М.: Мир, 1978. — 416 с.
4. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины. — М.: Мир, 1974. — 399 с.
5. Акаев А. А., Майоров С. А. Когерентные оптические машины. — Л.: Машиностроение, 1977. — 452 с.
6. Интегральная оптика/ Под ред. Т. Тамира. — М.: Мир, 1978—325 с.
7. Егорова Л. В., Рахманов В. Ф. Картинные элементы и устройства для параллельной обработки информации. — В кн.: Оптическая и электрооптическая обработка информации.—М.: Наука, 1975.— с. 145.
8. Принципы построения оптических процессоров с переменным оператором/ Н. Г. Басов, Ю. М. Попов, И. Н. Компанец и др. — Квантовая электроника, 1978, № 3, с. 526.
9. Способы построения оптического процессора с переменными операторами/ Н. Г. Басов, Ю. М. Попов, И. Н. Компанец и др. — Квантовая электроника, 1978, № 3, с. 533.
10. Мнацкян Э. А., Морозов В. Н., Попов Ю. М. Цифровая обработка информации на оптоэлектронных устройствах. — Квантовая электроника, 1979, № 6, с. 1225.
11. Орлов Л. А., Свидзинский К. К. Оптоэлектронный сумматор высокой производительности. — Автометрия, 1978, № 3, с. 54.
12. Карцев М. А., Маршалко Б. Г. Некоторые вопросы структурной организации специализированного вычислительного комплекса. — Автометрия, 1980, № 2, с. 3.
13. Некоторые алгоритмы эффективного решения задач на оптоэлектронном процессоре/ С. К. Ли, Э. А. Мнацкян, В. Н. Морозов и др. — Доклады АН СССР, 1978, т. 243, № 4, с. 870.
14. Володин Е. Б., Свидзинский К. К. Возможность построения интегральных управляемых транспарантов для оптической цифровой техники и связи. — Автометрия, 1977, № 4, с. 75.
15. Карцев М. А. Арифметика цифровых машин. — М.: Наука, 1969. — 260 с.
16. Майоров С. А., Ли С. К. Об одном методе выполнения арифметических операций. — Изв. вузов, Приборостроение, 1974, т. 17, № 2, с. 53.
17. Акушский И. Я., Юдицкий Д. И. Машинная арифметика в остаточных классах. — М.: Сов. радио, 1968. — 175 с.

18. Хайкин Б. Е. Операция, методы и структурные схемы обработки информации в оптических вычислительных машинах.—В кн.: Оптические методы информации. Л.: Наука, 1974, с. 33.
19. Закревский А. Д. Логические уравнения.—Минск: Наука и техника, 1975.—110 с.
20. Быстродействующие широкополосные элементы из ниобата лития для систем управления лазерным лучом / А. Л. Микаэлян, М. М. Коблова, Б. С. Кисилев и др.—Квантовая электроника, 1978, № 12, с. 2550.
21. Оптическая голография / Под ред. Р. Колфилда.—М.: Мир, 1982.—450 с.
22. Лаврищев В. П., Свидзинский К. К. Проблемы построения электронно-оптических цифровых вычислительных устройств и систем.—В. кн.: Оптическая и электрооптическая обработка информации. М.: Наука, 1975, с. 52.
23. Компанец И. Н. Управляемые транспаранты.—Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 4, с. 46.
24. Шеффер Д., Стронг Д. Пиктографические ЦВМ.—ТИИЭР, 1977, № 1, с. 157.
25. Селезнев В. Н., Плотников А. Ф. Материалы для оптической реверсивной записи информации.—Квантовая электроника, 1976, № 10, с. 73.
26. Taylor H. Guided Wave Electrooptic Devices for Logic Computation.—Appl. Optics, 15 May, 1978, N 10, p. 1493.
27. Optical Computation Using Residual Arithmetics. / A. Huang, Y. Tsunoda, J. Goodman, S. Ishihara.—Appl. Optics, 15 January, 1979, v. 18, p. 149.
28. Avizienis O. Signed-Digit Number Representation for fast Parallel Arithmetics.—IRE Trans., Electronic Computers, 1961, v. 10, N 3, p. 389.
29. Ruggiero I., Corwell D. An Auxiliary Processing System for Array Calculations.—IBM Systems Journal, 1969, N 1, p. 120.
30. Psaltis D., Casasent D. Optical Residual Arithmetics: a Correlation Approach.—Appl. Optics, v. 18, 15 January, 1979, p. 163.
31. Оптическая вычислительная техника. Тематический выпуск.—ТИИЭР, 1984, т. 72, № 7.—224 с.

Оглавление

Предисловие	3
Глава I. Элементарная база оптоэлектронных процессоров	6
1. Основные логические операции вычислительной техники	6
2. Основные требования к логическим элементам оптоэлектронных процессоров	16
3. Элементарная база оптоэлектронных цифровых процессоров	22
4. Развитие элементной базы оптоэлектронных процессоров методами интегральной оптики	44
Глава II. Принципы построения матричного оптоэлектронного процессора с управляющими операторами	59
5. Основные представления о системах счисления	59
6. Метод управляющих операторов в оптоэлектронных цифровых процессорах	65
7. Особенности обработки информации в оптоэлектронном матричном процессоре с управляющими операторами	73
8. Виды управляющих операторов для основных логических и арифметических операций	79
Глава III. Некоторые примеры эффективного решения задач на оптоэлектронном матричном процессоре	87
9. Минимизация логических выражений, поиск вектора в массиве	87
10. Расширение списка операций для вычислений логических выражений	92
11. Логическое умножение матрицы на вектор	98
Глава IV. Структурная организация оптоэлектронных матричных процессоров	102
12. Функциональная структура оптоэлектронного процессора с управляющими операторами	102
13. Структура связей оптоэлектронного процессора с электронными вычислительными машинами	104
14. Оценка производительности матричного оптоэлектронного процессора	108
Список литературы	111

35 к.



«РАДИО И СВЯЗЬ»