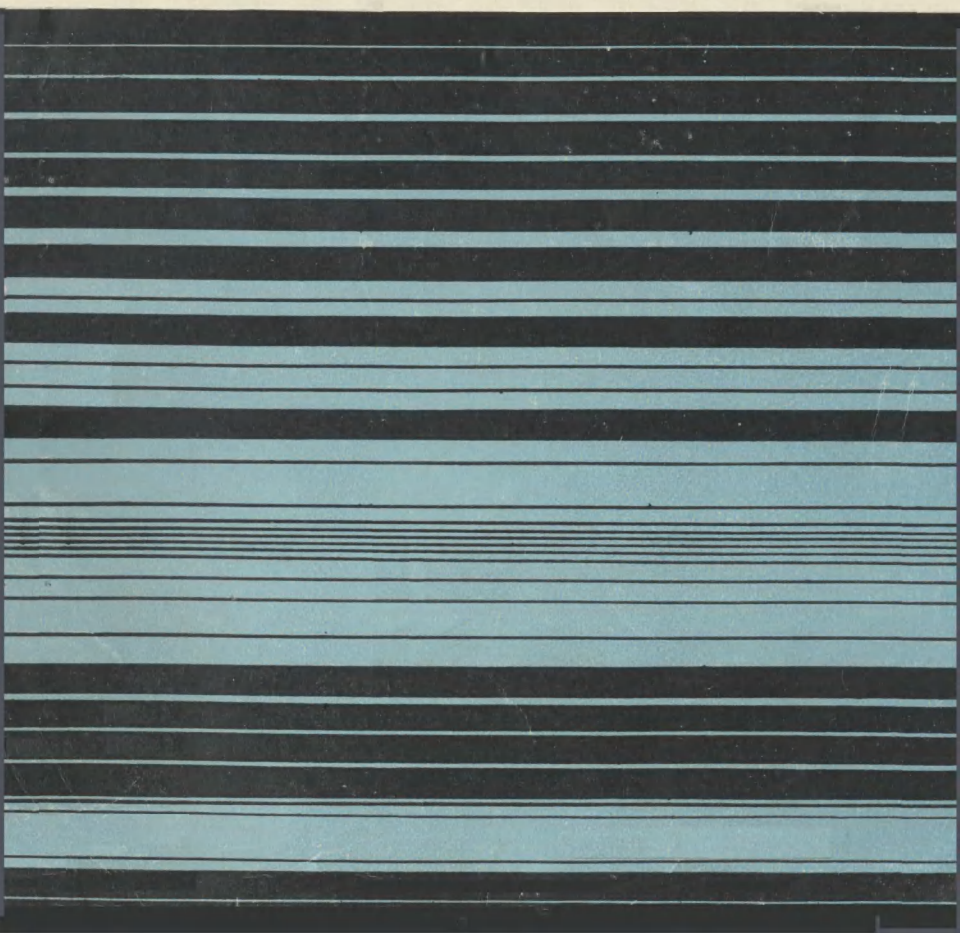


МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

Электроника

В. С. Сергеев, И. Н. Воженин

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МИКРОСХЕМЫ



МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

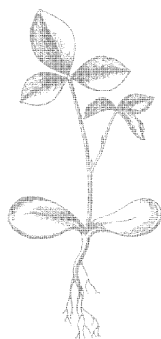
ЭЛЕКТРОНИКА

В. С. Сергеев
И. Н. Воженин

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ГИБРИДНЫЕ МИКРОСХЕМЫ



МОСКВА «СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1973



Scan AAW

6Ф0.32

С597

УДК 621.382.311—→621.396.6-181.5

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

В. М. Пролейко (отв. редактор), Н. Я. Аренберг, К. А. Валиев, Б. Ф. Высоцкий, С. А. Гаряинов, И. М. Глазков, Д. Б. Зворыкин, А. Н. Кармазинский, А. Ю. Малинин, Ю. Р. Носов, А. В. Пивоваров, Ф. П. Пресс, В. И. Стафеев, Ф. Г. Старос, Г. Г. Тотаровская, А. Ф. Трутко.

Сергеев В. С., Воженин И. Н. **Интегральные гибридные микросхемы.** М., «Сов. радио», 1973.

Излагаются основные вопросы проектирования и изготовления интегральных гибридных микросхем как тонкопленочных, так и толстопленочных. Приводится технологическая схема изготовления микросхем и достаточно полно описывается технология изготовления ее пассивных элементов: резисторов, конденсаторов, индуктивностей, проводников, а также технология сборки и герметизации микросхемы в целом. Формулируются требования к активным и пассивным элементам микросхемы. Дается краткое описание основного технологического и измерительного оборудования. Приводятся сведения об электрофизических параметрах и эксплуатационных характеристиках, основанные на результатах обработки большого статистического материала. В заключение указываются область применения таких схем и перспективы развития этого направления.

Брошюра рассчитана на широкий круг инженеров электронной техники, радионженеров и студентов старших курсов вузов соответствующих специальностей.

Табл. 10, рис. 21.

С $\frac{3312-029}{046(01)-73}$ 75—72

Введение

Процесс дальнейшего совершенствования современного радиоэлектронного оборудования, сопровождающийся увеличением числа элементов, входящих в состав аппаратуры, стал невозможен без эффективного повышения надежности радиоэлектронных устройств и одновременного уменьшения их веса и габаритов. Необходимость решения этой задачи обусловила появление новых конструктивно-технологических методов изготовления радиоэлектронной аппаратуры, в частности гибридных интегральных микросхем (ГИМ).

Направление интегральной электроники с использованием ГИМ основано на последовательном наращивании пленочных пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей, проводников) на единую изолирующую подложку, с последующим подсоединением активных полупроводниковых приборов в виде отдельных навесных деталей.

Важным достоинством этого конструктивно-технологического метода является возможность автоматизации производства и резкого снижения трудоемкости при изготовлении радиоэлектронной аппаратуры за счет следующих факторов:

— во-первых, одновременное изготовление многих элементов с их электрическими связями существенно сокращает долю монтажных операций, наиболее трудно поддающихся автоматизации и механизации;

— во-вторых, за счет внедрения в производство групповых методов обработки (одновременное нанесение пленок на большое число подложек, одновременное избирательное химическое травление, термообработка и т. д.);

— в-третьих, применение бескорпусных активных элементов и твердых схем со специальными жесткими выводами, пригодных для автоматического монтажа:

— в-четвертых, применение вычислительных машин для измерения, записи основных характеристик, и разбраковки микросхем.

Применение особо чистых исходных материалов и проведение технологического процесса в стерильных условиях, что исключает возможность загрязнения, малые габариты, компактность микроэлектронных узлов и блоков — все это дает возможность резко повысить надежность микроэлектронной аппаратуры.

Появление ГИМ — это результат интеграции двух технологических направлений: пленочного и полупроводникового, что позволяет наиболее эффективно реализовать возможности современной технологии. Ограниченность видов применяемых материалов и простота технологических процессов нанесения пленок, надежный технологический контроль обеспечивают малый разброс параметров получаемых элементов. В свою очередь, возможность изготовления элементов с малыми допусками (вплоть до 0,1—0,05%) облегчает проектирование, расширяет область применения и улучшает рабочие характеристики пленочных интегральных микросхем. Существенным преимуществом является то, что элементы, расположенные на одной плате, имеют одинаковые температурные характеристики и сроки службы, так как они сделаны в идентичных условиях. Соответствующий выбор подложки и рациональное расположение деталей значительно уменьшают паразитные связи, что улучшает рабочие характеристики микросхем. Техника одновременного изготовления резисторов, конденсаторов и индуктивностей открывает широкие перспективы для создания схем с распределенными параметрами. Увеличение уровня интеграции полупроводниковых элементов ведет к дальнейшему снижению веса, габаритов и потребляемой энергии, но вместе с тем ставит новые задачи по увеличению плотности и сложности коммутаций.

Гибридные интегральные микросхемы в настоящее время подразделяются по технологическому принципу их получения на толстопленочные и тонкопленочные.

Сущность технологии получения толстопленочных ГИМ заключается в нанесении через сетка-трафарет и последующем вжигании на изолирующую подложку проводящих, резистивных и диэлектрических композиций. Оптимальная толщина слоев, образующих элементы

микросхемы (проводники, резисторы, конденсаторы, индуктивности), составляет единицы и десятки микрон.

Сущность технологии получения тонкопленочных ГИМ заключается в получении пассивной части той же схемы путем последовательного нанесения проводящих, резистивных и диэлектрических слоев толщиной порядка десятых и сотых долей микрона; конфигурация элементов формируется либо с помощью трафаретов в момент нанесения пленки, либо путем избирательного химического травления сплошной пленки.

Технология производства толстопленочных микросхем значительно проще технологии тонкопленочных ГИМ и не требует дорогостоящего специального оборудования, поэтому позволяет организовать без больших затрат производство дешевых микросхем с хорошими эксплуатационными характеристиками. Выпуск таких микросхем из общего количества гибридных интегральных микросхем составляет большой процент.

Технология производства тонкопленочных микросхем позволяет достичь более высокой плотности монтажа элементов и их надежности по сравнению с технологией толстопленочных микросхем, поэтому развитие этого направления в настоящее время идет более интенсивно.

Конструкция гибридных интегральных микросхем

Основными конструктивными элементами ГИМ являются:

— пассивная часть с планарным расположением пленочных проводников, контактных площадок, резисторов и конденсаторов, конструктивные особенности которой определяются, прежде всего, конфигурацией и взаимным расположением пленочных элементов, ее размерами;

— навесные бескорпусные активные элементы либо с гибкими проволочными выводами, либо с жестко фиксированной системой выводов типа шариков и балок;

— навесные миниатюрные пассивные элементы (конденсаторы больших номиналов, трансформаторы, дроссели), которые применяются как исключение;

— корпус для закрепления выводов ГИМ и ее герметизации. Следует заметить, что некоторые ГИМ имеют бескорпусную конструкцию.

Оптимальная конфигурация пленочной схемы определяется многими факторами, такими, как: процент выхода годных изделий,

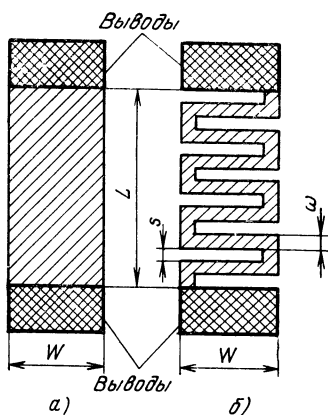


Рис. 1. Схематическое изображение пленочных резисторов.

стоимость, требуемая плотность упаковки, уровень интеграции, мощность рассеяния, номиналы элементов, величина допуска на номиналы и др. При конструировании следует максимально использовать преимущество пленочных эле-

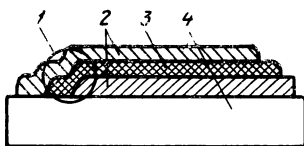


Рис. 2. Типичная структура пленочного конденсатора:
1 — «ступенька»; 2 — электроды;
3 — диэлектрик; 4 — подложка.

ментов — возможность осуществления их непосредственного контакта за счет перекрытия пленок. Поэтому обычно избегают располагать переходные проводники между элементами схемы, что также повышает их надежность.

В целях уменьшения габаритов подложку стремятся **максимально** заполнить пленочными элементами, **сократить** длину соединительных проводников за счет **изменения конфигурации** резисторов, обкладок конденсаторов и т. д. В зависимости от особенностей схемы и требований, предъявляемых к элементам, конфигурации и площади элементов могут значительно отличаться друг от друга. Однако можно сформулировать достаточно общие рекомендации по оптимальной конструкции пленочных элементов.

На рис. 1 представлены две основные конфигурации пленочных резисторов. Для конфигурации, представленной на рис. 1,а, сопротивление пленки R определяется площадью ее поперечного сечения Wd (W — ширина пленки, d — ее толщина), длиной рабочего участка L и удельным сопротивлением ρ_v .

Нормализованной мерой сопротивления пленочного резистора служит поверхностное удельное сопротивление:

$$\rho_s = \rho_v / d. \quad (1)$$

Фактическая величина сопротивления R равна произведению удельного поверхностного сопротивления на число квадратов N :

$$R = \rho_s N. \quad (2)$$

Конфигурация, представленная на рис. 1,б, используется для увеличения номинала тонкопленочных резисторов. Сопротивление таких элементов определяется уравнением

$$R \simeq \rho_s \frac{LW}{n\omega^2}, \quad (3)$$

где

$$n = (s/\omega) + 1. \quad (4)$$

Здесь ω — ширина линий; s — расстояние между ними.

Как видно из приведенных формул, сопротивление резисторов зависит от числа квадратов резистивного элемента и от его удельного поверхностного сопротивления.

Типичная структура пленочного конденсатора приведена на рис. 2. На подложку последовательно наносят три слоя: нижний, металлический, слой, выполняющий роль одной обкладки конденсатора (в дальнейшем будем ее называть нижней обкладкой), слой ди-

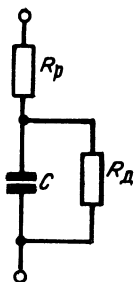


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема пленочного конденсатора.

электрика и верхний, металлический, слой, выполняющий роль второй обкладки конденсатора (верхняя обкладка)

Емкость пленочного конденсатора определяется по известной формуле плоского конденсатора

$$C = 0,0885 \epsilon S / d, \quad (5)$$

где C — емкость, пф, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость пленки, S — площадь перекрытия верхнего и нижнего электродов, см^2 ; d — толщина диэлектрической пленки, см

Структура пленочного конденсатора может быть и более сложной, если последовательно нанесены несколько диэлектрических и металлических слоев. В этом случае в числитель формулы (5) следует добавить коэффициент k , равный количеству нанесенных диэлектрических слоев.

На рис 3 приведена упрощенная эквивалентная схема пленочного конденсатора, потери в котором в основном обусловлены потерями в диэлектрике и обкладках. Первая часть этих потерь на эквивалентной схеме представлена параллельно подключенным сопротивлением R_d , имеющим обычно большую величину (порядка $10^7 - 10^9$ Ом), и определяется свойствами пленки диэлектрика. Потери в диэлектрике принято делить на миграционные и дипольно-релаксационные. Миграционные потери включают в себя потери проводимости как электронного, так и ионного тока. Их можно выразить через тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta_1$ в зависимости от удельного сопротивления пленки диэлектрика ρ_v

$$\text{tg } \delta_1 = 2 / f \epsilon \epsilon_0 \rho_v, \quad (6)$$

где f — частота, на которой проводят измерения; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума.

Дипольно-релаксационные потери обусловлены наличием слабо связанных электронов и ионов, которые под влиянием электрического поля способны смещаться на небольшое расстояние в решетке диэлектрика, преодолевая невысокие потенциальные барьеры, что вызывает поляризацию вещества с определенным временем релаксации τ . Тангенс угла дипольно-релаксационных потерь $\text{tg } \delta_2$ может быть выражен через относительную диэлектрическую постоянную на высоких ϵ_∞ и низких ϵ_s частотах

$$\text{tg } \delta_2 = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{\epsilon_f} \frac{2\pi f \tau}{1 + (2\pi f \tau)^2}. \quad (7)$$

Обычно пленки диэлектрика очень несовершенны и характеризуются различными временами релаксаций носителей тока. Это приводит к тому, что дипольно-релаксационные потери наблюдаются в сравнительно широком диапазоне частот, который при комнатной температуре равен $10^3 - 10^6$ Гц.

Вторая часть потерь (рис 3) представлена последовательно подключенным сопротивлением R_p значительной величины, обусловленной тем, что верхние и нижние электроды выполнены в виде тонких металлических пленок Тангенс угла потерь в обкладках конденсатора $\operatorname{tg} \delta_3$ равен

$$\operatorname{tg} \delta_3 = R_p 2\pi f C. \quad (8)$$

Как видно из формул (6)—(8), на низких частотах в диэлектрике преобладают миграционные потери, а на высоких — потери в обкладках конденсатора. Последние являются основным фактором, ограничивающим частотный диапазон пленочных конденсаторов. Особенно сильно это ограничение проявляется в конденсаторах из анодированного тантала, титана и других, у которых в качестве обкладок используются материалы с высоким удельным сопротивлением.

Расширение частотного диапазона может быть достигнуто за счет применения в качестве обкладок хорошо проводящих материалов — золота, меди, алюминия. При этом, однако, следует учитывать особенности нанесения пленок и свойства структуры металл — диэлектрик — металл.

Для одного и того же материала чем толще слой обкладок, тем меньше сопротивление R_p и тем на больших частотах может работать пленочный конденсатор. Однако на практике толщина нижнего металлического слоя всегда ограничена наличием «ступеньки» l (см рис. 2) края нижнего электрода, над которым проходит верхний электрод. В этом месте слой диэлектрика всегда тоньше и наиболее вероятен пробой конденсатора. При достаточно малой толщине диэлектрического слоя и большой толщине металлической пленки возможны разрыв пленки диэлектрика на этой ступеньке и замыкание между верхней и нижней обкладкой.

Второй причиной, ограничивающей толщину нижней обкладки конденсатора, являются микронеровности ее поверхности, которые при прочих равных условиях тем больше, чем толще пленка.

Как видно из формулы (5), емкость пленочного конденсатора увеличивается с увеличением ϵ , его площади и уменьшением d . Обычно такие конденсаторы характеризуются удельной емкостью $C_{уд}$ — емкостью на 1 см^2 . На практике, как правило, стремятся к уменьшению площади конденсатора и увеличению $C_{уд}$. Получение тонких диэлектрических слоев с высоким значением ϵ и пробивного напряжения представляет сложную задачу, от решения которой зависят габаритные размеры и надежность изготавливаемых микросхем.

Пленочные индуктивности выполняются в виде плоской проводящей спирали. Номиналы таких индуктивностей обычно не превышают нескольких наногенри, а добротность — 100. Плоские индуктивности больших номиналов становятся неприемлемы из-за габаритов.

Наивысшая плотность упаковки достигается при многослойном расположении пленочных элементов с использованием в качестве прокладок между ними пленок диэлектрика. Недостатком этой конструкции микросхемы является отсутствие доступа к внутренним элементам, что исключает возможность подгонки номиналов, и уве-

личивает число технологических операций. В большинстве случаев однослойное расположение элементов отвечает основным требованиям, предъявляемым к микросхеме. Для сокращения протяженности коммутационных линий обычно используют несколько пересечений проводников.

Минимальные линейные размеры элементов составляют 100—200 мкм, минимальные расстояния между элементами — 100—200 мкм, максимальная площадь конденсаторов — порядка 2 см².

Навесные активные элементы (диоды, транзисторы или полупроводниковые интегральные схемы) с гибкими выводами из золотой проволоки диаметром 30—50 мкм подсоединяются к пленочной схеме пайкой или сваркой. Для закрепления элементов на плате используются влагостойкие клеи, часто выполняющие роль дополнительной защиты от климатических воздействий.

Однако использование активных элементов с гибкими выводами не обеспечивает высокой надежности соединений, а также практически исключает возможность автоматизации и механизации этих операций. В настоящее время широкое распространение получили активные элементы с жесткими выводами различных конструкций: полупроводниковые приборы с «рамочными», «шариковыми», «балочными» выводами. Наибольшее распространение получили приборы с «шариковыми» выводами. По конструкции выводы напоминают сферические выступы на кристалле, обычно медные, покрытые припоем. При подсоединении активных элементов этого типа используется метод «перевернутого кристалла», который заключается в припайке или приварке кристаллов шариковыми выводами на монтажные площадки микросхемы лицевой стороной вниз.

Корпусирование ГИМ заключается в креплении схемы к основанию корпуса, подсоединении выводов микросхем к соответствующим контактным площадкам и герметизации корпуса сваркой или пайкой крышки с основанием корпуса.

При выборе корпуса учитывается схема компоновки, вопросы теплоотвода, эксплуатационные характеристики активных элементов и пленочных микросхем. Например, если активные элементы, входящие в микросхему, являются влагостойкими, то герметизация корпуса не требуется. Или же, если активные элементы не допускают

повышение температуры до 200—300 °С, то корпуса, герметизирующиеся пайкой при более высоких температурах, являются непригодными.

В настоящее время применяются корпуса преимущественно прямоугольной формы, поскольку микросхемы имеют прямоугольную форму.

Наибольшее распространение получили металlostеклянные, металлокерамические и пластмассовые корпуса. Основанием и крышкой металlostеклянных корпусов служит ковар. Выводы микросхемы герметично крепятся с помощью стеклянных изоляторов, впаянных в основание корпуса. Основанием металлокерамических корпусов служит керамика, крышкой — металл. Выводы микросхемы герметично запрессовываются в основание корпуса. Оба типа корпусов обладают большой теплопроводностью, механической прочностью, герметичностью. К недостаткам следует отнести их высокую стоимость. Металлокерамические корпуса, кроме того, требуют температуру пайки к основанию порядка 300—400 °С, что нежелательно для многих активных элементов и пленочных микросхем.

Основным достоинством пластмассовых корпусов является их низкая стоимость и довольно высокая механическая прочность; к числу недостатков следует отнести пониженную влагостойкость и малую теплопроводность.

Технология толсто пленочных гибридных интегральных микросхем

2.1. Особенности конструкции толсто пленочных ГИМ

Наиболее распространенная конструкция толсто пленочных ГИМ представляет собой керамическую подложку с пассивными и активными элементами, армированную необходимым количеством выводов, закрытую со стороны электрической схемы металлическим колпачком и залитую с обратной стороны компаундом (рис. 4). На рис. 5 приведена схема расположения резистора на подложке.

Материал и конструкция подложки должны быть пригодными для массового производства и обеспечивать следующие характеристики: высокую прочность; необходимую точность линейных размеров; хорошую теплопроводность; хорошую адгезию к наносимым материалам; достаточную термо- и химическую стойкость.

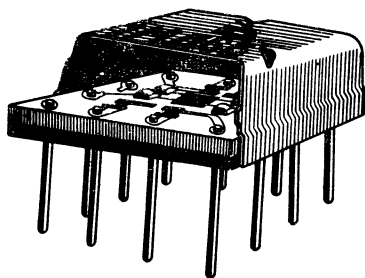


Рис. 4. Конструкция толсто пленочных ГИМ.

Указанным требованиям достаточно полно удовлетворяет высокоглиноземистая керамика, которая, как правило, и служит в качестве подложки для толсто пленочных микросхем. Чистота поверх-

ности подложки в определенных пределах почти не влияет на качество пассивных элементов, однако, если шероховатость поверхности больше 2 мкм, разброс величины сопротивлений резисторов увеличивается. С другой стороны, при шероховатости поверхности порядка

2 000—500 Å адгезия пасты к подложке резко уменьшается. Высокие требования к точности линейных размеров подложки обусловлены необходимостью автоматизации процессов изготовления микросхем. Для высокомеханизированного производства допуски на основные размеры должны лежать в пределах до $\pm 0,05$ мм.

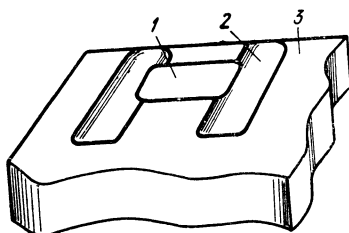


Рис. 5. Расположение резистора на подложке:

1 — резистор; 2 — проводник, 3 — подложка.

Схема технологического процесса изготовления толсто пленочных ГИМ приведена на рис. 6. Ниже будут рассмотрены основные материалы и операции, характерные для толсто пленочной технологии.

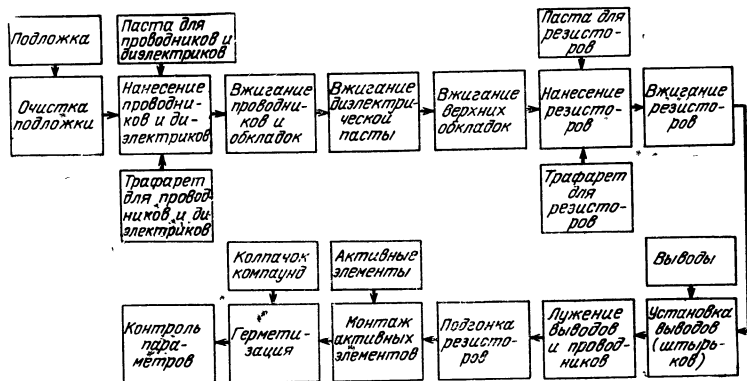


Рис. 6. Схема технологического процесса изготовления толсто пленочных ГИМ.

2.2. Пасты

Приготовление паст является важнейшим этапом в производстве толсто пленочных микросхем. Пасты делятся на проводящие (для проводников, контактных площадок и обкладок конденсаторов), резистивные и

диэлектрические (для конденсаторов и изоляционных слоев).

Как правило, пасты содержат основные материалы, придающие пленкам необходимые физические свойства, и вспомогательные, служащие для обеспечения конструктивно-технологических требований. Так, для хорошей адгезии частиц основного материала между собой и к подложке в состав паст вводится мелкодисперсный порошок стекла.

После вжигания пасты стекло обеспечивает прочность сцепления с подложкой более 100 кг/см^2 . Коэффициент термического расширения возжженного слоя должен быть близким к коэффициенту термического расширения подложки для обеспечения малой величины механических напряжений в пленке. Для придания пасте вязкости, позволяющей легко проникать через трафареты и не растекаясь оседать на подложке, вводятся дополнительные органические вещества и растворители. Получается следующий состав пасты: $2/3$ смеси стекла и основного материала и $1/3$ органических материалов.

Резистивные и проводящие пасты. Структура резистивных и проводящих пленок представляет собой дисперсное распределение проводящих частиц в стеклянной матрице. Проводимость такой системы непосредственно связана с электрическим контактированием металлических частиц и, следовательно, зависит от размеров этих частиц и их плотности. Они, в свою очередь, определяются не только соотношением содержания проводникового материала в стекле, но и сложными процессами взаимного растворения компонентов, окислительно-восстановительными реакциями, кристаллизацией при вжигании.

Так, для проводящих пленок на основе серебра и золота требуется достаточно высокая концентрация металла для обеспечения проводимости (рис. 7). При недостаточной концентрации металла происходит его полное растворение в стекле; по своим свойствам такая пленка является диэлектриком. Когда же концентрация металла достигает некоторой определенной величины, наступает интенсивное образование кристаллов металла, проводимость такой пленки резко возрастает при незначительном увеличении концентрации проводниково-

го материала. Поэтому пасты на основе серебра и золота могут использоваться лишь как проводящие. Резистивные пасты должны обеспечивать менее сильную зависимость их удельного сопротивления от концентрации компонентов для поддержания необходимой воспроизводимости номиналов резисторов

В качестве резистивных паст обычно используют композиции на основе смеси серебра и палладия. Как видно из рис. 7, сопротивление смеси палладий-серебро в меньшей мере зависит от изменения соотношения металл — стекло.

Результаты исследования (рис. 8) двухкомпонентных паст (Pd, Ag) показали, что:

— сопротивления, полученные из паст на основе серебра, имеют большой положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), а на основе палладия ТКС имеет отрицательный знак; таким образом появляется возможность регулировать величину ТКС путем подбора состава паст на основе Pd и Ag, в частности, оптимальным соотношением Ag и Pd является 1 : 1 и при их суммарной концентрации 40—50% ТКС не выходит за пределы $\pm 4 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$;

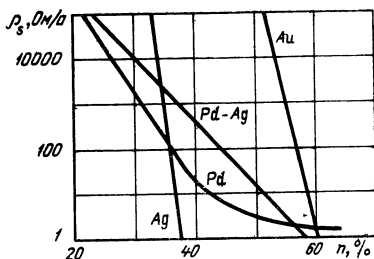


Рис 7 Зависимость удельного сопротивления от концентрации металлических порошков в стеклянной фритте

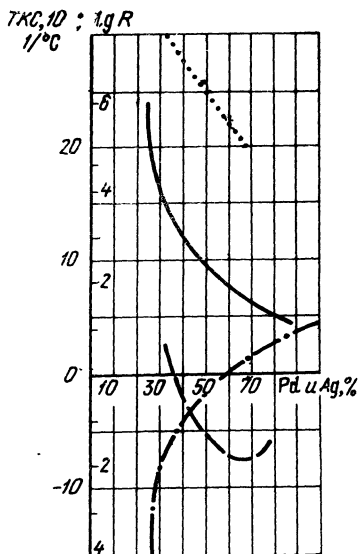


Рис 8 Зависимость сопротивления и ТКС для двухкомпонентных сплавов от взаимной концентрации Pd и Ag

— и — — — R и ТКС для составов, содержащих Pd; ... и — · — · — R и ТКС для составов, содержащих Ag

— составы, содержащие серебро и палладий, обеспечивают сопротивление от сотен ом до сотен килоом; при содержании палладия более 50% резистивная пленка имеет плохую адгезию к подложке.

Диэлектрические пасты для конденсаторов. Для получения конденсаторов на подложку между проводящими обкладками наносят диэлектрический слой. В качестве основного материала для этих паст служит керамика с высокой диэлектрической постоянной и низким тангенсом угла диэлектрических потерь.

2.3. Трафареты

Для нанесения на подложку проводников, резисторов или других элементов в соответствии с рисунком схемы используются сетчатые трафареты, технология изготовления которых определяет качество пассивной части микросхем. Трафареты должны обеспечивать высокую точность воспроизведения рисунка и быть износоустойчивыми.

Этим требованиям наиболее полно отвечают трафареты, изготовленные в виде сетки из нержавеющей стали. Обычно используются сетки с диаметром проволоки

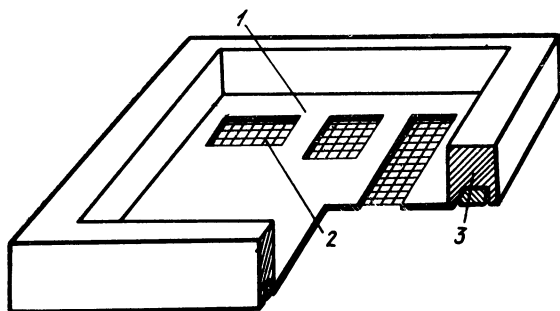


Рис 9 Сетчатый трафарет:

1 — участки сетки с ячейками, закрытыми эмульсией; 2 — участки сетки с удаленной эмульсией, 3 — рамка.

порядка 0,1—0,002 мм и размером ячейки до сотых долей миллиметра. Мелкие ячейки обеспечивают хорошую четкость линии, крупные — большую однородность пленки, так как при применении мелких ячеек не исключена возможность закупоривания отверстий.

Перед нанесением рисунка сетка равномерно натягивается и закрепляется на жесткую рамку. Величину и равномерность натяжения сетки следует контролировать путем прогиба ее при определенной нагрузке и прямоугольности ячеек. Как правило, размеры трафарета в четыре раза превышают размеры подложки, на которую наносится рисунок.

После тщательного обезжиривания и промывки на сетку равномерным слоем наносится фотоэмульсия. После высыхания последней на нее проектируется рисунок фототрафарета, причем желательно, чтобы прямые линии фототрафарета были совмещены с линиями сетки. После экспонирования ультрафиолетовым светом пленка полимеризуется, а неэкспонированные участки рисунка растворяются.

Так, в сетчатом трафарете часть ячеек остается открытыми, образуя рисунок необходимой конфигурации (рис. 9).

2.4. Нанесение паст на подложку

Подложка, на которую нужно нанести пасту, устанавливается под трафаретом на некотором расстоянии от него; паста размещается поверх трафарета и передви-

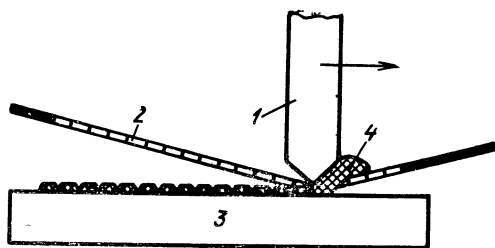


Рис 10 Схема нанесения пасты через сетка-трафарет
1 — ракели, 2 — сетка-трафарет, 3 — подложка, 4 — паста

жением ракеля через отверстия в трафарете переносится на подложку в виде столбиков, копирующих отверстия в сетке. Растекаясь, эти столбики соединяются, образуя такой же рисунок, как на трафарете. Схема нанесения пасты через сетка-трафарет представлена на рис. 10.

Для операции нанесения важными факторами являются: воспроизводимость скорости и давления ракеля.

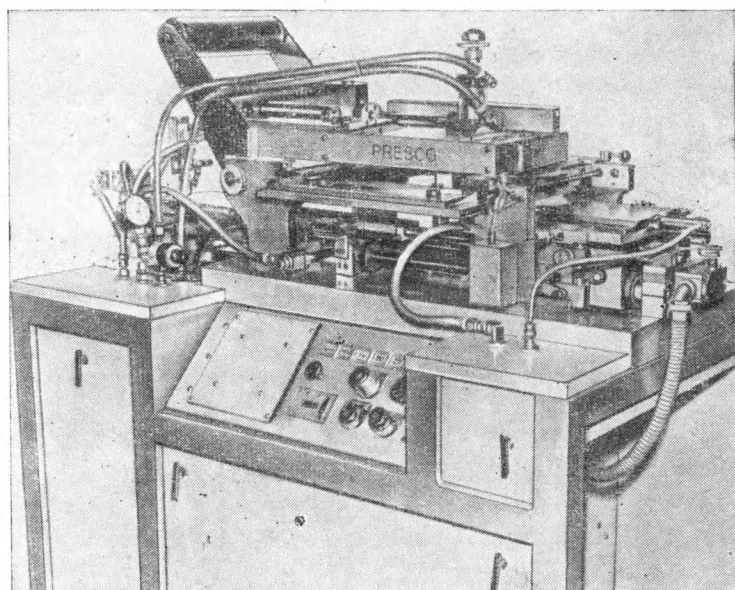


Рис. 11. Автомат фирмы «Presco» для нанесения пасты.

Давление ракеля должно быть порядка $0,05 \text{ кг/см}^2$, скорость движения порядка 15 см/с . Необходимо соблюдать строгую параллельность подложки, ракеля и трафарета. Рекомендуется выдерживать расстояние между трафаретом и подложкой в пределах $0,4\text{—}0,5 \text{ мм}$.

Для устранения неравномерности толщины резисторов рекомендуется составлять топологию так, чтобы все резисторы располагались по длине в одном направлении по движению ракеля. Существует достаточно большое количество автоматов и полуавтоматов, обеспечивающих хорошую воспроизводимость и производительность (до нескольких тысяч нанесений в час). На рис. 11 представлен такой автомат фирмы «Presco».

2.5. Термическая обработка паст

После нанесения на подложку пасты подвергаются термической обработке — сушке и обжигу.

Сушка необходима для испарения растворителя из пасты. Наилучшим способом, при котором растворитель

испаряется без образования пленки, является обогрев инфракрасными лучами, длина волны которых более 3 мкм.

Первой фазой процесса обжига является выжигание органических веществ при температуре изделия порядка 300—400 °С. Оптимальная скорость возрастания температуры, при которой не наблюдается образование пузырьков, составляет 20 °С/мин. На этом этапе температура не является критичной, поэтому точность ее регулировки может быть невысокой.

Спекание — следующая фаза термической обработки — является самой ответственной, особенно для резистивных паст. Спекание происходит в окислительной атмосфере; при этом большинство металлических частиц окисляется, а частицы стеклянной фритты, размягчаясь, спекаются между собой и с подложкой. Температура и время на этом этапе критичны, так как химические реакции, определяющие конечный состав пленки и их физико-химические характеристики, протекают со скоростью, которая почти удваивается при повышении температуры всего лишь на 10 °С.

Процесс спекания минеральной части резистивных паст на основе Pd—Ag происходит в две стадии. На первой стадии при температуре от 320 до 520 °С в основном наблюдается окисление палладия. На второй стадии при температуре свыше 520 °С окись палладия частично восстанавливается и образует с серебром твердый раствор. В зависимости от соотношения AgPd/PdO удельное поверхностное сопротивление изменяется от 20 до 10 кОм. С ростом сопротивления пленок содержание окиси палладия достигает 40%. Проведенные исследования зависимости величины сопротивления от температуры вжигания резистивных паст на основе Pd—Ag показали, что в интервале температур 500—650 °С происходит увеличение сопротивления с течением времени, а в интервале 760—840 °С — его падение.

Так как характеристики обожженной пленки зависят от температуры вжигания и времени обжига, эти параметры строго поддерживаются постоянными и контролируются термометрами. Точность поддержания температуры составляет ± 1 °С.

Химические процессы, протекающие во время обжига, могут регулироваться в широких пределах путем изменения состава газов, находящихся в печи. Однако это

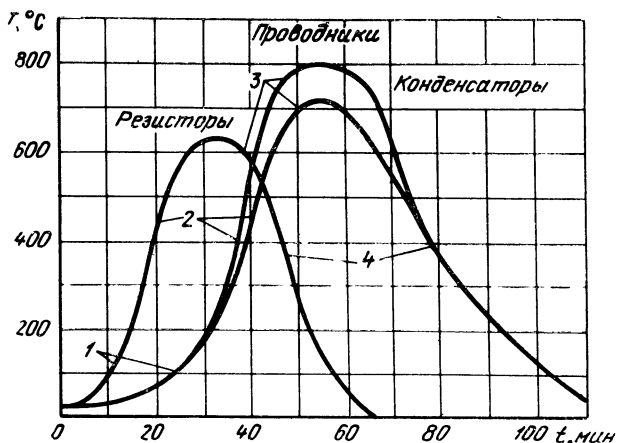


Рис 12. Режимы термообработки проводящих, резистивных и диэлектрических паст.

1 — сушка, 2 — выжигание органической связки, 3 — спекание, 4 — охлаждение

значительно усложняет конструкцию печи, поэтому состав желательно поддерживать постоянным. Для поддержания постоянства состава атмосферы в печи создают ламинарный поток воздуха путем наклона муфеля печи на 2° относительно горизонтали (входное отверстие приподнято).

Известно, что воздух сам по себе является хорошей окислительной средой, а состав его довольно стабилен. Газы, выделяющиеся при выгорании связок, уходят через входное отверстие, не влияя на процесс обжига пленок.

Это особенно важно потому, что при выгорании связующих материалов выделяется водород, который при высокой температуре легко взаимодействует с частицами

окислов металла, находящимися в пленках. По этой же причине необходимо контролировать и влажность атмосферы.

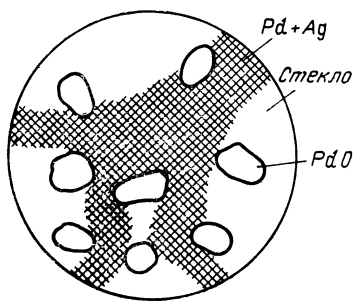


Рис 13. Структура резистора после термической обработки.

На рис. 12 представлены режимы термической обработки паст. Температура и время обжига показаны условно, так как они зависят от конструкции печи и состава паст. Термическая обработка паст производится, как правило, в конвейерных печах, которые наряду с высокой производительностью обеспечивают стабильный режим и высокий процент выхода годных изделий.

На рис. 13 схематично представлена структура толсто пленочного резистора. Основные параметры резисторов толсто пленочных ГИМ приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Основные параметры толсто пленочных резисторов и конденсаторов

Параметр	Резисторы	Конденсаторы
Толщина пленки, мкм	15—20	25—30 (диэлектрик)
Минимальный размер, мм	0,6×0,6	1×1
Удельное поверхностное сопротивление, Ом/□	5—5000	—
Удельная емкость, пФ/см ²	—	3700
Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	±4·10 ⁻⁴	—
Температурный коэффициент емкости, 1/°С	—	±4·10 ⁻⁴
Пробивное напряжение, В	—	150
Диэлектрическая проницаемость	—	250
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,02
Диапазон номиналов, Ом, пФ	5—68 000	60—320
Удельная мощность рассеяния, Вт/см ²	0,5	—

Технология тонкопленочных микросхем

3.1. Методы нанесения тонких пленок

Тонкие проводящие, резистивные и диэлектрические пленки могут быть получены различными способами: термическим испарением в вакууме, катодным распылением, химическим осаждением и др.

Термические методы испарения в вакууме различают по способу подачи энергии к испаряемому материалу. Наибольшее распространение получили «прямое термическое испарение» и испарение «электронным лучом». В первом методе испарителями являются простые проволоочки, ленты, «лодочки», подогреваемые проходящим через них током; во втором методе необходимое для испарения тепло выделяется за счет бомбардировки потоком электронов, эмиттированных раскаленным катодом и получивших большую энергию в постоянном электрическом поле.

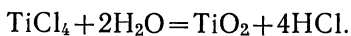
При катодном распылении энергия, необходимая для отрыва атомов от исходного вещества, получается не термическим путем, а в результате бомбардировки ионами плазмы. Плазму получают либо с помощью высокочастотного разряда, либо используют тлеющий разряд между двумя электродами, находящимися под разностью потенциалов 3—5 кВ при давлении $(20—100) \times 10^{-3}$ тор в среде инертного газа.

При химических методах осаждения пленок в поток исходного газа или смеси газов помещают подложку, подогретую до температуры, при которой на ее поверхности станет возможной химическая реакция, например, разложение элементоорганических соединений или реакция синтеза, замещения или гидролиза. Продуктами реакции являются твердый неорганический осадок на поверхности подложки и газообразные составляющие, которые удаляются потоком исходного газа.

Примером реакции разложения элементоорганических соединений может служить разложение тетраэтоксилана $[\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4]$ при температуре свыше 600°C , твер-

дым осадком является SiO_2 , газообразными составляющими CH_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , CO , H_2 .

Примером использования реакции синтеза является получение пленок TiO_2 гидролизом хлоридов титана.



Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. Так, катодное распыление позволяет осаждать пленки тугоплавких и сложных по химическому составу материалов однородные на большой площади. Однако в процессе катодного распыления происходит реакция распыляемого вещества с остаточными газами в камере, что существенно ухудшает воспроизводимость основных свойств таких пленок. Наличие остаточных газов в виде неконтролируемых добавок к инертному газу связано с их десорбцией во время распыления с внутренней поверхности рабочей камеры. Эффективность откачки десорбированных газов при сравнительно высоком давлении в рабочей камере, необходимом для поддержания плазмы, является недостаточной.

Термическое испарение в вакууме позволяет получать наиболее чистые пленки. Степень их загрязнения контролируется давлением в камере остаточных газов. Для понижения давления нет принципиальных ограничений. Однако термическим испарением можно получать лишь пленки сравнительно простых по химическому составу веществ.

Высокая степень термической диссоциации или большое различие в парциальных давлениях отдельных компонентов сложных соединений создает серьезные трудности для воспроизведения в пленке химического состава таких соединений.

Метод реакции в газовой фазе позволяет получать пленки практически любого состава и не требует сложного оборудования. Однако он пока недостаточно разработан.

Выбор способа нанесения тонких пленок при производстве ГИМ определяется в основном двумя факторами: возможностью получения всех тонкопленочных элементов с высокими конструктивными и эксплуатационными характеристиками при малой трудоемкости. Наиболее универсальным способом достаточно полно разработанным и широко освоенным промышленностью,

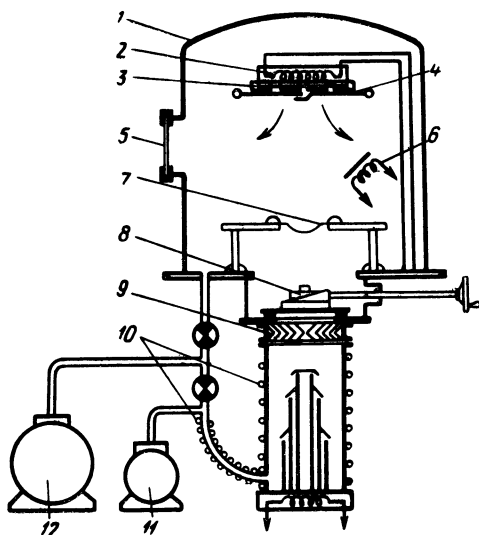


Рис 14 Схематическое изображение установки для термического испарения в вакууме.

1 — металлический колпак, 2 — держатель подложек с подогревателем, 3 — маска, 4 — заслонка, 5 — окно, 6 — ионный измеритель скорости напыления, 7 — испаритель, 8 — основной клапан, 9 — охлаждаемая ловушка, 10 — диффузионный насос, 11 — вспомогательный насос, 12 — основной форвакуумный насос

в настоящее время является термическое испарение в вакууме.

Установка для нанесения пленок вакуумно-термическим способом схематически изображена на рис. 14. Она состоит из рабочей камеры, вакуумной системы и пульта управления с источниками питания.

Рабочая камера состоит из цилиндрического съемного колпака 1 и базовой плиты, имеющих вакуумно-плотное сочленение друг с другом. Внутри камеры расположены держатель подложек с подогревателем 2, маска, обеспечивающая нужную конфигурацию осадка, испаритель 7 для нагревания испаряемого вещества, заслонка 4 для управления временем осаждения испаряемого вещества, а также датчики для контроля температуры подложки, температуры испарителя, скорости осаждения и толщины пленок, номиналов резисторов и конденсаторов, а также давления остаточных газов. Камера имеет смотровое окно для наблюдения за процессом испарения.

Вакуумная система состоит из паромасляного и вращательного насосов, последовательно соединенных между собой. Подключение паромасляного насоса к рабочей камере осуществляется через клапан после обязательного предварительного понижения давления в камере с помощью вращательного насоса. Выпускаемые промышленностью вакуумные установки обеспечивают давление в рабочей камере порядка 10^{-6} тор.

На пульте управления устанавливаются контрольные приборы для регистрации и поддержания в нужном диапазоне основных параметров технологического режима осаждения пленки: температуры испарителя, температуры подложки, скорости осаждения, давления остаточных газов и др. Температуру испарения вещества обычно выбирают соответствующей давлению его паров порядка 10^{-1} — 10^{-3} тор. При давлениях менее 10^{-3} тор скорость осаждения пленки настолько мала, что не представляет практического интереса; при давлениях более 10^{-1} тор, как правило, наблюдается разбрызгивание вещества за счет интенсивного отделения сорбированных газов, осадок получается рыхлым с сильно развитым рельефом поверхности.

Скорость испарения вещества Φ [г/см²·с] линейно зависит от давления пара над его поверхностью P и может быть представлена в виде:

$$\Phi = 1/17,14P (M/T)^{1/2},$$

где T — абсолютная температура испаряемого вещества; M — его молекулярный вес.

В свою очередь давление пара является функцией температуры и может быть рассчитано по изменению свободной энергии ΔF [кал/г·моль]:

$$\lg P = 2,881 - \Delta F/RT,$$

где R — газовая постоянная.

3.2. Методы получения тонких пленок заданной конфигурации

Независимо от типа используемых материалов пленочная микросхема всегда представляет собой определенную геометрическую конфигурацию элементов. Су-

ществует очень много методов придания пленкам заданной конфигурации, однако наиболее широкое распространение получили методы свободной маски и селективного травления (фотолитографический метод).

Метод свободной маски основан на экранировании подложки с помощью специальных съемных трафаретов кроме тех ее участков, на которые наносятся элементы данного слоя. Как видим, в этом случае процессы нанесения пленки и придания ей конфигурации совмещены. Для того чтобы рисунок нанесенной пленки имел четкий край и совпадал с рисунком маски, свободные маски выполняют из тонкой металлической фольги (толщиной порядка 50—100 мкм) и плотно прижимают к подложке с помощью специальных маскодержателей. Точность рисунка маски находится в пределах $\pm (5-7)$ мкм. Точность воспроизведения конфигурации пленочных элементов может быть того же порядка.

При использовании метода селективного травления процессы нанесения тонкой пленки, и придания ей необходимой конфигурации проводятся отдельно. Вначале на всю поверхность подложки осаждают пленку нужного материала будущей микросхемы, затем на эту пленку наносят слой специального фоточувствительного лака (фоторезиста) и с помощью фототехники придают защитному слою требуемую конфигурацию.

С незащищенных фоторезистом участков осажденную тонкую пленку удаляют химическим травлением. Главным достоинством этого метода является возможность создания сложных конфигураций слоя с минимальными размерами элементов и высокой точностью (порядка 2—3 мкм).

Обеспечение заданной конфигурации элементов с высокой точностью обычно начинается с вычерчивания координатографом конфигурации этих элементов в увеличенном масштабе (от 10:1 до 20:1) на листовом стекле, покрытом эмалью. Такой чертеж называется оригиналом микросхемы. Размеры стекла обычно порядка 750 × 750 мм², толщина 6—8 мм.

Эмаль наносят с помощью краскораспылителя равномерно 7—8 слоями для получения непрозрачного покрытия. Общая толщина покрытия находится в пределах от 0,05 до 0,07 мм.

Вычерчивание фигур фотооригинала проводится по таблице топологического чертежа, затем с помощью

пинцета удаляется пленка эмали по контурам фигур. Точность вычерчивания фотооригиналов на современных координатографах достигает ± 25 мкм.

Негативное или позитивное изображение оригинала микросхемы в масштабе 1:1 по отношению к самой микросхеме выполняют путем его фотографирования с высокой точностью. Такое изображение фотооригинала называют фотошаблоном. Для изготовления фотошаблонов используются высококонтрастные фотопластинки с разрешающей способностью около 500 линий/мм. Самый распространенный в настоящее время метод изготовления фотошаблонов — оптико-механический. Метод базируется на процессах прецизионной фотографии и механического прецизионного мультиплицирования. Изготовление оригиналов, репродуцирование, мультиплицирование давно применяются в фотографии, полиграфии, кинематографии, но количественные требования, предъявляемые к ним в рассматриваемом случае, столь жестки, что оптико-механический метод изготовления фотошаблонов следует признать особой, качественно отличной областью репродукционной техники.

Репродукцию (экспонирование) производят на специальных фотографических установках. С целью максимального использования стандартных подложек, применяемых в производстве микросхем, единичные изображения каждого слоя схемы размножают на площади, соответствующей размерам стандартной подложки. Обработка экспонированных фотопластин включает: проявление, промывку, фиксирование. После контроля размеров элементов фотошаблона и точности мультипликации производят ретушь под микроскопом: светлые точки и царапины на непрозрачных элементах изображения закрывают тушью или краской для технической ретуши. Проверенный и отретушированный фотошаблон обычно является эталонным. Рабочие копии получают методом контактной печати.

Для увеличения износостойкости рабочих фотошаблонов чаще всего в качестве непрозрачного слоя используют пленки хрома, нанесенные на стекло термическим осаждением в вакууме.

Описанный метод изготовления фотошаблонов является достаточно сложным и трудоемким.

В последнее время в технологии изготовления фотошаблонов все чаще находят применение ЭВМ. Так, на-

пример, довольно широкое распространение получили автоматические координатографы, управляемые ЭВМ или же работающие по программе, полученной на ЭВМ.

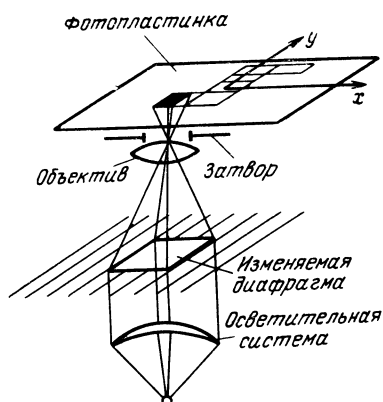


Рис. 15. Принцип действия фотонаборной машины

Производительность таких координатографов в несколько раз превышает производительность обычных координатографов. Однако такое применение ЭВМ позволяет лишь в какой-то определенной мере сократить время, затрачиваемое на изготовление фотошаблонов. В настоящее время разработан ряд методов с применением ЭВМ, которые исключают целые звенья из традиционной технологической цепи. Речь идет о так называемых фотонаборных машинах. Сущность этих методов заключается в том, что специальные агрегаты автоматически по программе с ЭВМ экспонируют фотопластинку и таким образом исключается необходимость разработки чертежей на фотошаблоны и, что очень существенно, необходимость изготовления фотооригиналов. Уже разработано несколько вариантов фотонаборных машин, и ниже на примере установки David Map. Co. рассматривается их принцип действия (рис. 15). Фотообъектив проектирует в плоскости эмульсии фотопластинки изображение диафрагмы, которая имеет прямоугольную форму и которая в определенных пределах может дискретно менять свои размеры. Осветительная система состоит из источника света и конденсора. Фотопластинка с помощью исполнительного механизма может занимать различные положения относительно оптической оси объектива, перемещаясь по осям x и y . Максимальный размер изображения диафрагмы $2,5 \times 2,5$ мм. Дискретность изменения этого изображения 50 мкм. По программе с ЭВМ исполнительный механизм перемещает кассету с фотопластинкой в нужное положение; другой исполнительный механизм также по программе

с ЭВМ устанавливает необходимый размер диафрагмы; далее в статическом положении происходит экспонирование фотопластинки с помощью затвора. Затем цикл повторяется и экспонируется соседний участок и так до тех пор, пока не будет проэкспонирована вся фотопластинка до получения необходимого рисунка фотошаблона. Точность этой установки достаточно высока, порядка 2—3 мкм. Что касается качества изображения, то оно лучше, чем при обычных методах изготовления фотошаблонов, так как рабочее поле изображения достаточно мало.

При использовании метода селективного травления передача рисунка с фотошаблона на светочувствительное защитное покрытие производится методом контактной печати, при котором фотошаблон непосредственно накладывают на подложку, покрытую слоем фоторезиста, и экспонируют ультрафиолетовым источником света.

В зависимости от назначения используют либо негативные, либо позитивные фоторезисты. При облучении пленки негативного фоторезиста фотохимические процессы приводят к потере растворимости, как правило, за счет полимеризации. После обработки проявителем необлученные участки удаляются и на подложке остается негативное изображение фотошаблона. При облучении пленки позитивного фоторезиста фотохимические процессы в ней обуславливают потерю устойчивости к некоторым травителям, как правило, за счет деструкции полимеров. После обработки проявителем облученные участки удаляются, а на подложке остается позитивное изображение фотошаблона.

При обеспечении высокой точности рисунка к фоторезисту, технологии его нанесения на подложку и технике экспонирования предъявляется ряд требований. В частности, толщина слоя фоторезиста должна быть равномерной и строго определенной, источник ультрафиолетового света калиброванным, а время экспозиции с малым допуском.

При недостаточном времени экспонирования структурные изменения в облученных участках фоторезиста остаются незавершенными. Для негативного фоторезиста необлученные участки будут растворяться при обработке травителем, как и необлученные. Тогда защитное покрытие окажется либо плохого качества, либо не

произойдет передачи рисунка с фотошаблона на фоточувствительный слой. Для позитивного фоторезиста недооблученные участки, напротив, будут плохо растворяться в травителях.

При передержках структурные изменения в фоторезисте распространяются на граничные области затененных участков из-за рассеяния света самим слоем фоторезиста. Глубина проникновения, а следовательно, и невозпроизводимость геометрических размеров рисунка, будут определяться временем передержки. Поскольку оптимальное время экспонирования пропорционально толщине слоя фоторезиста, то становится понятным требование к воспроизводимости толщины и ее равномерности. Хорошая воспроизводимость толщины и равномерности слоя достигается при нанесении фоторезиста методом центрифугирования при специальном законе изменения скорости вращения

Следует отметить также, что разрешающая способность фоторезиста должна обеспечивать выполнение элементов с минимальными линейными размерами и в нужном допуске. Кроме того, слой фоторезиста должен быть беспористым и устойчивым к химическому воздействию травителя для сохранения качества напыленного слоя.

Способы изготовления свободных масок, равно как и их конструкции, разнообразны, однако наиболее широкое использование в промышленности получили биметаллические маски, состоящие из бронзовой фольги толщиной 100—150 мкм и гальванически осажденного никеля толщиной порядка 10 мкм.

На одну сторону бронзовой фольги после тщательной очистки поверхности наносят слой фоторезиста, который засвечивают через соответствующий фотошаблон, проявляют и тщательно отмывают остатки удаленного фоторезиста. Другую сторону фольги покрывают специальным лаком, после чего производят электрохимическое наращивание никеля, который осаждается на незащищенных участках поверхности. После снятия фоторезиста производят химическое травление бронзовой фольги, при этом во время травления никелевый осадок играет роль защитной пленки. Разность между размерами элементов на фотошаблоне и на никелевом слое та же, что и при фотолитографическом методе — единицы микрон. Травление бронзовой фольги через отверстия в никелевом слое происходит не только в глубину, но и по бокам. Ли-

нейные размеры отверстий в бронзовой фольге оказываются на 30—50 мкм больше, чем в никелевом слое. К подложке биметаллическая маска прижимается никелированной стороной. Такая конструкция свободной маски позволяет обеспечить достаточную жесткость и упругость, поскольку ее суммарная толщина сравнительно велика и вместе с тем снизить до минимума размытость краев напыленных элементов из-за эффекта полутени, обусловленного толщиной маски.

3.3. Резисторы

Как было показано выше, значение номинала резистора пропорционально числу квадратов N резистивной дорожки и удельному поверхностному сопротивлению ρ_s . Число квадратов можно регулировать путем подбора конфигурации элемента; удельное поверхностное сопротивление в конечном счете определяется толщиной и структурой пленок, зависящих от условий формирования слоя на подложке.

Структуры тонких пленок делятся на: 1) аморфные; 2) коллоидные (мелкозернистые) с размером зерен менее 100 \AA ; 3) гранулярные (крупнозернистые) с размером зерен не менее 1000 \AA ; 4) монокристаллические.

Резистивные пленки, как правило, являются мелкозернистыми. Их структура во многом определяется механизмом осаждения, который может быть описан следующим образом. Атомы металла, попадая на подложку, в начальный момент образуют двумерный пар, причем атомы мигрируют по поверхности подложки и могут испаряться. При достижении определенной плотности двумерный пар насыщается; образуются центры конденсации. В зависимости от температуры подложки происходит переход (двумерного пара в двумерную жидкость или в двумерную кристаллическую фазу. При температурах ниже критической T_1 происходит кристаллизация, в более высоком температурном интервале T_1 — T_2 — образование двумерной жидкости, а в последующем — трехмерного кристаллического слоя. При температурах выше T_2 происходит отражение молекулярного пара от поверхности подложки. Если температура ниже T_2 , то после образования зародышей по одной из описанных схем

дальнейший рост пленки происходит за счет укрупнения зародышей.

Повышение температуры подложки при постоянной скорости осаждения будет вызывать увеличение миграционной подвижности атомов и, следовательно, уменьшение плотности зародышей. Островковая структура пленки будет сохраняться и при более высоких значениях средней толщины осадка. При этом вместе с ростом геометрических размеров кристаллов в плоскости подложки увеличивается и высота кристаллов, т. е. шероховатость пленки.

Наряду с температурой подложки существенное влияние на структуру пленки оказывает ряд других технологических факторов, главными из которых являются: природа образующего пленку вещества, природа подложки и состояние ее поверхности, состав и парциальное давление остаточных газов в вакууме, скорость испарения материала, толщина осажденной пленки.

Увеличение скорости осаждения приводит, как правило, к заметному росту плотности зародышей и, следовательно, к увеличению дисперсности структуры.

Многие металлы обладают большим сродством к кислороду, поэтому при высоком давлении в камере и малой скорости испарения возможно значительное окисление пленок как кислородом, так и парами воды.

Количество молекул остаточных газов при давлении 10^{-5} — 10^{-6} тор далеко не так мало, как могло бы показаться с первого взгляда. Например, при скорости осаждения 600 \AA/мин и давлении 10^{-5} тор количество молекул металла, достигающих поверхности, равно числу молекул остаточных газов, ударяющихся о подложку. Основная часть остаточных газов — вода. При окислении меняется, естественно, структура и другие характеристики пленки.

Сказанное относится прежде всего к хрому, сплавы и металло-диэлектрические смеси на основе которого получили наиболее широкое распространение в качестве резистивных материалов.

Величина зерна в напыленной пленке прежде всего определяется изменением свободной энергии при конденсации металла; металлы с более высокой температурой кипения, например Mo, Ta, Cg, будут обладать меньшими размерами кристаллов

Величина энергии связи адсорбированных атомов

металла с подложкой также достаточно сильно влияет на плотность зародышей и, следовательно, на дисперсность структуры. Чем прочнее связь между адсорбированными атомами и подложкой, тем выше плотность зародышей и дисперсность структуры.

Проводимость тонких металлических пленок. В зависимости от толщины металлической пленки различают три вида проводимости. При толщинах свыше 10^3 \AA удельное сопротивление и ТКС приближаются к значениям, характерным для монолитного материала. При толщине несколько сот ангстрем объемное сопротивление увеличивается из-за уменьшения средней длины свободного пробега электронов вследствие рассеяния на границах пленки и на межкристаллических барьерах; ТКС таких пленок приближается к нулю. В пленках, имеющих толщину несколько десятков ангстрем, объемное сопротивление увеличивается на несколько порядков, а ТКС становится отрицательным. Отрицательный ТКС предполагает наличие в пленке процесса активации носителей заряда. Можно представить, что электроны передаются от одной гранулы к другой посредством термоэлектронной эмиссии Шоттки или туннельного перехода термически возбужденных электронов.

Приблизенно сопротивление тонких пленок можно рассматривать как суммарное сопротивление отдельных гранул и барьеров между ними. Характер общего сопротивления определяет величину и знак ТКС. Если в нем преобладает сопротивление зерен, то проводимость пленки будет носить металлический характер, а ТКС будет положительным. При преобладании сопротивления, обусловленного прохождением электронов через промежутки между зернами, проводимость пленки будет иметь полупроводниковый характер; ТКС будет отрицательным.

Свойства тонкопленочных резисторов. Итак, свойства тонкопленочных резисторов во многом определяются технологическими факторами, т. е. условиями, при которых осаждается резистивная пленка. На практике для каждого материала подбираются свои оптимальные условия изготовления пленок; предельные значения параметров резисторов в конечном счете определяются материалом резистивной пленки. Установлено, что надежные резисторы с достаточно малым ТКС могут быть получены при толщине пленок не менее 100 \AA . Большинство ме-

галлов при этой толщине имеют сопротивления менее 20 Ом/□, что существенно ограничивает область их практического использования

Для создания микросхем требуются резистивные пленки с удельным поверхностным сопротивлением от десятков до десятков тысяч ом, а объемное сопротивление таких пленок при приемлемых толщинах должно быть 10^2 — 10^4 МОм·см. Достаточно высокое объемное сопротивление имеют пленки сплавов и керметов.

Наиболее широкое распространение в последнее время получили сплавы и керметы, содержащие хром, в частности Cr, NiCr, Cr/SiO, Cr/Al₂O₃ и ряд других

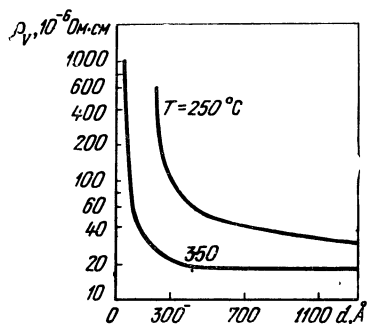


Рис. 16 Зависимость удельного сопротивления пленок хрома ρ_v от толщины пленки d и температуры подложки в момент формирования пленки.

В связи с этим следует рассмотреть сначала основные свойства хромовых тонкопленочных резисторов

Хром. Отличительной особенностью хрома является большая разница объемного сопротивления в монокристаллическом состоянии и в пленке. Сопротивление пленок может превышать сопротивление монокристалла в 4—100 раз в зависимости от условий осаждения и толщины пленки. Основными факторами,

определяющими удельное объемное сопротивление и ТКС пленки, являются температура подложки, скорость осаждения и давление остаточных газов в камере. На рис. 16 представлены кривые зависимости удельного поверхностного сопротивления хрома от толщины пленки при различных температурах осаждения.

ТКС пленок сопротивлением 300 Ом/□ при осаждении со скоростью $2\text{Å}/\text{с}$ равен $3 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹ и около 0 при $18\text{Å}/\text{с}$.

Резкое изменение сопротивления пленки может быть объяснено изменением структуры пленки и содержанием примесей, особенно Cr₂O₃. При повышении температуры подложки сопротивление пленки, как обычно, уменьшается за счет укрупнения зерен. Приемлемые по ста-

бильности резистивные пленки на основе хрома имеют поверхностное сопротивление 200—500 Ом/□ и рабочую температуру до 300 °С. Существенным недостатком хрома как резистивного материала является трудность контроля заданных параметров пленки из-за очень сильной зависимости объемного сопротивления пленки от условий испарения и осаждения.

Нихром. Нихром является тем классическим материалом, который в первую очередь был использован для изготовления тонкопленочных резисторов. Добавление никеля увеличивает удельное сопротивление и уменьшает ТКС чистого хрома. Уже в монокристаллическом состоянии сопротивление сплава никеля с хромом составляет 100—108 МОм·см; объемное сопротивление пленки колеблется в пределах от 125 до 350 МОм·см. В настоящее время нихром исследован достаточно полно с точки зрения применения его в производстве высокостабильных пленочных резисторов.

Принципиальной трудностью при испарении NiCr является фракционирование сплава, поскольку компоненты имеют резко отличающиеся парциальные давления: хром при температуре 1100—1500 °С испаряется почти в 10 раз быстрее никеля, поэтому при испарении сплава, содержащего 20% Cr и 80% Ni, можно получить пленку, содержащую до 80% Cr. Во многих работах исследовались пленки с содержанием хрома от 6 до 60%. Наилучшие свойства получены на пленках с содержанием хрома от 30 до 50%.

Для увеличения воспроизводимости химического состава конденсата при испарении многокомпонентных соединений в последнее время широко применяют метод импульсного испарения. Поскольку малые порции, непрерывно поступающие на испаритель, испаряются практически мгновенно и полностью, композиция смеси точно воспроизводится в пленке. Тем не менее этот способ испарения нихрома не получил широкого распространения из-за трудностей изготовления порошка нихрома, обладающего высокой пластичностью; усложнение технологии не дает существенного улучшения свойств резисторов по сравнению с классическими способами сублимации и испарения из расплава. То же можно отнести и к методу испарения электронным лучом.

Так как нихром в отличие от хрома не является столь критичным к основным технологическим факторам, на

его основе получают резисторы с хорошими свойствами при различных условиях. По-видимому, это обстоятельство явилось причиной того, что именно нихром оказался самым распространенным материалом для изготовления тонкопленочных резисторов.

Большинство разработчиков считает, что нихром позволяет получать резистивные пленки с удельным сопротивлением 200—300 Ом/□. Детальное исследование технологических особенностей вакуумного осаждения нихромовых пленок позволило установить, что воспроизводимые удельное сопротивление и ТКС получаются при концентрации Ni от 50 до 95% и толщине пленок более 100—130 Å; при этом чем больше в пленке никеля, тем выше сопротивление.

Иногда в литературе появляются сообщения о получении резистивных нихромовых пленок с удельным сопротивлением до 10^4 Ом/□ с приемлемой стабильностью и ТКС. Однако эти сообщения, как правило, не содержат подробных сведений. Диапазон сопротивлений, установленный для нихрома в настоящее время практикой, не превышает 300 Ом/□ при ТКС не более 10^{-4} град⁻¹ с необратимым изменением номиналов менее 0,5% за 1000 ч работы под действием электрической нагрузки при 70°C.

Резисторы на основе металлодиэлектрических смесей. Необходимость получения высокоомных резисторов малой площади обусловила применение металлодиэлектрических смесей, наиболее изученным представителем которых является кермет, состоящий из хрома и монооксида кремния. Способ испарения и технологические режимы изготовления резисторов из этой смеси обсуждались выше.

Таблица 3.1

Основные параметры технологического режима нанесения тонких резистивных пленок на основе Cr/SiO

Испаритель	W или Ta лента
Способ испарения	Взрывной
Температура испарителя, °C	1700—2200
Давление пара SiO, мтор	300—20 000
Давление пара Cr, мтор	1—100
Вакуум, тор	10^{-5} — 10^{-4}
Скорость осаждения, Å/с	1—15
Температура подложки, °C	150—500
Температура отжига, °C	350—500

В табл. 3.1 приведены технологические характеристики процесса изготовления тонкопленочных резисторов.

Композиция пленок отличается от композиции исходного порошка; возможные составляющие пленок: SiO , SiO_2 , Si , Cr_2O_3 , Si_mCr_n . Свеженанесенные пленки являются аморфными, после отжига при температуре 450—500 °С — поликристаллическими.

В зависимости от содержания хрома можно получать резистивные пленки с удельным поверхностным сопротивлением от нескольких десятков ом на квадрат до десятков килоом.

В табл. 3.2 приведены основные характеристики резисторов из смеси хрома и монооксида кремния по данным Беккермана и Вагнера.

Таблица 3.2

Основные параметры тонкопленочных резисторов на основе Cr/SiO

Характеристики	Беккерман	Вагнер
Стабильность	0,2%/1000 ч (200 °С) 2,0%/1000 ч (300 °С)	0,2%/2000 ч (125 °С)
Содержание хрома в исходном материале, %	50—90	25—90
Толщина пленки, Å	200—1200	200
ρ_S , Ом/□	10—1000	2000—20 000
ρ_V , МОм/см	100—5000	—
ТКС, 10^{-6} град $^{-1}$	—25 ÷ +100	0 ÷ ±75
Изменение сопротивления при отжиге, %	—5 ÷ +50	+30 ÷ +150

Важнейшей характеристикой резисторов является их стабильность. Сравнительные испытания NiCr и Cr/SiO с одинаковыми удельными сопротивлениями показали более высокую стабильность пленок Cr/SiO. Даже при жестких испытаниях резисторов (при температуре 40 °С, влажности 98 % и электрической нагрузке 2 Вт/см²) резисторы на основе кермета за 3500 ч изменили номинал всего на 1,2 %, в то время как нихромовые резисторы отказали через 800 ч. Большая стабильность характерна и для высокоомных пленок из кермета.

Однако в связи с тем, что свойства пленок из металлоэлектрических смесей очень сильно зависят от технологических факторов, резисторы имеют плохую воспроизводимость номинала и температурного коэффициента. Это обусловлено прежде всего трудностью получения заданной композиции основных компонентов (металла и диэлектрика) в пленке при испарении. Кроме того, не исключена возможность образования целого ряда различных соединений в пленке в результате химического взаимодействия элементов, входящих в состав порошка, как между собой, так и с остаточными газами, особенно с кислородом и парами воды, которые в большом количестве поступают в формирующуюся пленку.

По этим причинам термообработка пленок проводится не только с целью повышения стабильности резистора, но и для подгонки к необходимой величине удельного сопротивления. Термообработка без кислорода, как правило, приводит к уменьшению сопротивления, причем тем большему, чем ниже температура подложки при осаждении и выше содержание SiO_2 . При отжиге на воздухе в результате окисления сопротивление может увеличиваться, если процесс окисления преобладает над процессом упорядочения структуры.

Резисторы на основе тантала. Несмотря на очень высокую температуру испарения $\approx 3000^\circ\text{C}$, тантал успешно применяется. Основными методами получения пленок тантала являются: испарение электронным лучом в высоком вакууме и катодное распыление. Последний метод в силу ряда технологических преимуществ получил наибольшее распространение. Этим методом возможно напылять незащищенные стабильные резисторы с удельным сопротивлением до $100 \text{ Ом}/\square$.

Для увеличения удельного сопротивления пленок Ta и стабилизации номиналов используются два метода. В первом пленки защищают слоем выращенного анодированного окисла толщиной около 250 \AA и затем отожженного при $250\text{--}400^\circ\text{C}$ в течение 5 ч. При этом наблюдается изменение сопротивления от 0,5 до 10%. В другом используется только термическая стабилизация при $200\text{--}250^\circ\text{C}$ на воздухе. Во время отжига из-за термического окисления толщина поверхностной окисной пленки увеличивается приблизительно на $50\text{--}300 \text{ \AA}$. Окись тантала, особенно полученная анодированием, обеспечивает пре-

красную защиту от воздействия атмосферы и прежде всего от влаги. Термическое окисление поверхности используется также для доводки сопротивлений до номинала с точностью 0,5—1%. Анодирование, однако, дает лучшие результаты.

3.4. Конденсаторы

Качество и надежность линейных гибридных тонкопленочных микросхем в значительной мере определяется качеством и надежностью тонкопленочных конденсаторов, по габаритам значительно превышающих резистивные элементы, как правило, занимающих большую часть площади микросхемы, но резко уступающих резистивным элементам по стабильности и особенно по катастрофическим отказам.

Большинство параметров конденсатора, таких, как удельная емкость, номинал, рабочее напряжение и надежность, являются взаимно-коррелированными. Задача увеличения удельной емкости конденсаторов при одновременном увеличении их надежности является достаточно сложной и может быть решена путем удачного выбора материалов и технологических режимов изготовления структуры металл — диэлектрик — металл.

Нижняя обкладка конденсатора должна обеспечивать:

1. Малое сопротивление при небольшой толщине металлического слоя. С увеличением сопротивления потери на высоких частотах увеличиваются (8). Увеличению толщины нижней обкладки препятствует уменьшение толщины диэлектрического слоя на границе обкладки. Если толщина нижней обкладки превышает толщину диэлектрического слоя, то возможен даже разрыв диэлектрика и замыкание нижней и верхней обкладок на границе нижней обкладки. В силу этого стремятся использовать материалы с высокой электропроводностью, такие, как Cu, Au, Al, Ag. При использовании в качестве нижней обкладки таких материалов, как Ti, Ta, Cr, частотный диапазон конденсаторов ограничивается несколькими мегагерцами.

2. Технологичность получения металлических слоев. Под этим подразумевается: невысокая температура испарения, минимальная агрессивность расплава по отношению к материалу испарителя, невысокая температура

подложки при осаждении в целях хорошей адгезии металлической пленки к подложке. Материалы с высокой электропроводностью Cu, Au, Al, Ag имеют относительно невысокую температуру испарения. 1000—1400 °С. Испарение серебра, меди и золота производят обычно из молибденовой лодочки. Алюминий чаще всего испаряют из вольфрамового испарителя, выполненного в виде спирали из жгута проволоочек диаметром 0,8—1,2 мм. При

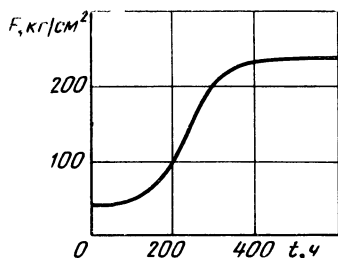


Рис. 17. Зависимость адгезии пленки Al к стеклянной подложке от времени выдержки при комнатной температуре.

расплаве алюминий растворяет вольфрам, так что испаритель может быть использован не более 5—10 раз до полного разрушения.

3. Высокую адгезию металлических слоев к подложке. Все металлы по их адгезии к диэлектрическим подложкам можно разбить на три группы. К первой группе относятся Au, Ag, Cu, имеющие малое сродство к кислороду и адгезию к подложке, ко второй группе — металлы

с низкой температурой плавления и достаточно большой температурой образования окисла — Zn, Cd, Sn, Pb, Al. Адгезия пленок этих металлов также мала. И, наконец, к третьей группе относятся металлы, имеющие большую температуру образования окисла и сравнительно высокую температуру плавления: Mg, Zr, Ti, Mo, Fe, Cr, Ni, Mn. Адгезия этих металлов достаточно высока. Во время экспериментов металлические пленки наносились на холодные подложки. Первоначальная адгезия даже для металлов последней группы была сравнительно невелика. При хранении образцов в естественных условиях адгезия пленок непрерывно увеличивалась до максимума в течение 600 ч хранения. Типичная зависимость величины адгезии пленки Al от времени ее хранения в естественных условиях приведена на рис. 17.

Высокая адгезия металлической пленки к стеклянной подложке объясняется образованием промежуточного слоя окисла значительной толщины на границе между пленкой и подложкой за счет диффузии кислорода через пленку к границе металл — подложка. Сравнительно невысокая адгезия металлов второй группы обусловлена

совершенством кристаллической структуры пленок, являющейся следствием большой миграционной подвижности атомов с низкой температурой плавления

Так как адгезионные свойства хорошо проводящих пленок Ag, Cu, Al, Au невысоки — они легко отслаиваются при небольших механических напряжениях — напыление этих металлов в качестве контактных соединений и обкладок конденсатора производят с подслоем металлов, дающих высокую адгезию к подложке: Cr, Ti, Mo, Mn.

4. Устойчивость металлических слоев к климатическим и химическим воздействиям. В условиях повышенной температуры и влажности выявлена высокая коррозионная стойкость пленок Al, Au, Mo, Cr, Ni. Пленки Cu нуждаются в дополнительной защите или герметизации. Обычно в качестве защитного покрытия для пленок Cu используют напыленные в вакууме пленки Ni.

5. Невысокую миграционную подвижность атомов применяемых металлов и невысокое значение коэффициента диффузии в диэлектрик. Из-за высокой миграционной подвижности атомов пленки Ag и Au не находят применение в качестве обкладок конденсатора; по этой же причине возможности использования медных обкладок существенно ограничены

6. Мелкодисперсность полученного металлического слоя.

Естественно, что при приложении к электродам разности потенциалов поле внутри диэлектрика будет неоднородным; максимальное значение напряженности достигается в области вершины выступа электрода. В тех случаях, когда величина тока определяется напряженностью поля у поверхности катода, ток с отдельных выступов может значительно превышать ток с остальной площади, так как напряженность поля у вершины выступа может в несколько раз превышать среднюю напряженность поля.

Рассмотрим технологические возможности уменьшения шероховатости электродов (прежде всего нижнего) при условии сохранения высокого значения электропроводности. Исходя из требований к обкладкам тонкопленочного конденсатора, наиболее употребительным материалом является алюминий.

Для пленок Al зависимость размеров зерна от температуры в диапазоне 25—150°C выражена довольно сла-

бо. В этом температурном диапазоне при скоростях осаждения $100\text{--}200 \text{ \AA}/\text{с}$ и толщинах пленки $2000\text{--}3000 \text{ \AA}$ размеры зерен в плоскости подложки в среднем составляют $200\text{--}300 \text{ \AA}$, максимальные размеры кристаллитов в плоскости подложки достигают 2000 \AA , максимальная высота — 500 \AA .

Изменение скорости осаждения пленок в диапазоне $20\text{--}200 \text{ \AA}$ заметно не влияет на размеры зерен в плоскости подложки; при этом высота микровыступов находится в обратно пропорциональной зависимости от скорости осаждения. Из данных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что концентрация зародышей пленки мало зависит от скорости осаждения пленки в интервале значений $20\text{--}200 \text{ \AA}$ и существенно зависит от температуры подложки, особенно при $T \geq 150^\circ\text{C}$.

Поскольку адгезия пленок Al с ростом температуры увеличивается, в качестве оптимального режима осаждения пленок Al следует признать температуру подложки 120°C и скорость осаждения $100\text{--}200 \text{ \AA}/\text{с}$. При дальнейшем увеличении скорости осаждения приходится увеличивать температуру испарителя, что вызывает разбрызгивание расплавов Ti, Cr, Mo.

Для уменьшения размеров микровыступов и сохранения высокой адгезии и электропроводности в настоящее время получило широкое распространение применение подслоя металла с высокой температурой кипения, например Ti, Cr, Mo.

Подложки. В качестве подложек используются стекла, ситаллы, керамика, глазурованная керамика, реже монокристаллы.

Очень ровные поверхности имеют плавленый кварц, полированные сапфир и ситаллы, тянутые щелочные и алюмосиликатные стекла. При толщине диэлектрической пленки порядка 1000 \AA требуется поверхность подложки с шероховатостью не более 250 \AA , т. е. имеющие 14 и выше класс обработки поверхности. Для сглаживания микрорельефа иногда подложку грунтуют слоем SiO толщиной $1\text{--}2 \text{ мкм}$; при этом высота микровыступов уменьшается с сотен до десятков ангстрем.

Одним из обязательных требований к подложкам тонкопленочных микросхем является отсутствие высокой концентрации ионов щелочных металлов, так как это привело бы к высокой поверхностной проводимости во влажной атмосфере и выщелачиванию. Миграция щелочи может привести к эрозии пленочных элементов микросхемы.

Существенными являются и ряд других требований, предъявляемых к подложкам: механическая прочность, теплопроводность, температура плавления (размягчения) и др.

В табл. 3.3 приведены основные характеристики подложек, применяемых в современной микроэлектронике.

Диэлектрические пленки. Наиболее широкое распространение в современной практике получили два метода нанесения диэлектрических пленок: термическое испарение в вакууме и анодирование осажденных на подложку пленок вентильных металлов — Al, Ta, Ti, Nb и др.

При выборе материала диэлектрика и методов его нанесения должно быть обращено внимание не только на диэлектрическую постоянную, тангенс угла потерь и электрическую прочность, и особенно на условия получения пленок в целях избежания дефектов — сквозной пористости, участков с повышенной проводимостью, механических напряжений.

Пористость пленки диэлектрика является причиной возникновения коротких замыканий и пробоя в конденсаторах. Скорость диффузии атомов металла по поверхности намного больше, чем в объеме диэлектрика, поэтому наиболее вероятным местом образования мостиков проводимости является пора. Сорбция влаги и газов порой также ведет к увеличению проводимости. Любое локальное увеличение проводимости может явиться источником теплового пробоя. И, наконец, при высоких электрических полях прочность конденсатора будет ограничена возможностью пробоя газа в порах.

Большие механические напряжения в пленках приводят с течением времени к неоднородности химического состава, растрескиванию, шелушению. Появление механических напряжений обусловлено как кинетикой осаждения пленки, так и разностью температурных коэффициентов пленки и подложки.

Таким образом, к диэлектрику тонкопленочного конденсатора предъявляются достаточно жесткие требова-

Основные характеристики подложек ГИМ

Материал диэлектрика	Боро- силикат	Алюмо- силикат	Распла- вленный кварц	96%-ная окись Al_2O_3	Фото- керамика	Титанат бария	TiO_2	BeO
Плотность, г/см ³	2,13	2,53	2,32	3,7	2,46	5,5	4,24	3,08
Температура размягчения, °С	700	910	1500	1650	700	1550	1630	—
Температура плавления, °С	1100	1100	1728	2050	—	1700	1920	2550
Линейный коэффициент теплово- го расширения · 10 ⁶	3,9	5,4	0,2	6,4	10,4	8,1	9,1	7,5
Теплопроводность, кал/см · с град	0,002	0,003	0,003	0,05	0,005	0,003	0,01	0,2
Степень гладкости, Å	25	25	25	75	300	25—27	25—75	25—75
Химическое сопротивление	—	Среднее	—	Отличное	—	Хорошее	—	Отличное
ϵ	4,1	6,3	3,8	10	5,6	$10^2—10^4$	80—110	7,1
$tg \delta$, %	0,25	1,0	0,02	0,02	0,02	2,0	0,2	0,006
$Ig \rho_{V1}$, Ом · см	17	14	15	14	15	12	14	15
Стойкость платы, долл.	0,02	0,02	2,00	0,11	—	0,03	0,20	2,0

ния не только по электрическим характеристикам, но и по механическим, тепловым, коррозионной стойкости, пористости.

Пожалуй, самым распространенным диэлектриком для тонкопленочных конденсаторов в настоящее время является напыленная моноокись кремния.

Доказано существование монооксида кремния (SiO) в паровой фазе; при конденсации вероятность диспропорционирования довольно велика. Поэтому, даже если известно соотношение химического состава $Si:O=1:1$, трудно определить, что представляет собой материал в пленке: однородное вещество или конгломерат окисей и элементарного кремния. В настоящее время точно установлено существование окислов кремния SiO_2 , Si_2O_3 , SiO. В табл. 3.4 приведены некоторые электрофизические характеристики пленок этих окислов.

Таблица 3.4

Некоторые электрофизические характеристики пленок окислов кремния

Окисел	Зона интенсивного поглощения, мкм	Зона ослабленного поглощения, мкм	ϵ	ТКЕ, 10^4 1/°C	$\text{tg } \delta \cdot 10^3$	$E_{\text{пр}}'$, 10^6 В/см
SiO	10,2	—	5,0—6,0	2—3	10	1—2
Si ₂ O ₃	9,4—9,7	11,5	4—5	1,0	5	1
SiO ₂	9,3—9,4	12,5	3,6—4,1	0,3÷1,0	5	3—5

Применяемые диэлектрические пленки монооксида кремния в зависимости от исходного материала и условий их получения имеют большой диапазон соотношения $Si:O$ — от 1:1 до 1:1,5, так что обычно принята запись SiO_x , где x изменяется от 1 до 1,5. Моноокись кремния испаряют в вакууме при давлении порядка 10^{-5} тор из танталовых, ниобиевых или молибденовых термических испарителей. Поскольку она возгоняется из твердой фазы (интенсивно, начиная с температуры 1150°C), а теплопроводность твердого материала невелика, то при испарении с открытых испарителей может происходить откалывание мельчайших частиц материала и выбрасывание их в сторону подложки. Поэтому SiO испаряют из закрытых источников с диффузными отражателями различного типа. Поскольку моноокись крем-

Таблица 3.5

Коэффициент прохождения света в ультрафиолетовой части спектра для пленок толщиной 920 Å, напыленных в вакууме при давлении $5 \cdot 10^{-6}$ тор

Скорость напыления, Å/с	Коэффициент прохождения света ($v=2,76 \cdot 10^4$ см ⁻¹)
50, 80, 100	42
40	44
30	45
20	52
10	66
5	87
1	53

ния диссоциирует и легко присоединяет кислород, параметры получаемых пленок будут сильно зависеть от соотношения молекул исходного материала, поступающего на подложку в единицу времени, и молекул остаточных газов, в особенности кислорода. В табл. 3.5 представлены данные о зависимости пропускной способности пленок SiO_x в ультрафиолетовых лучах от скорости напыления.

Как видно из таблицы, при увеличении скорости осаждения и уменьшении

давления в камере в пленках увеличивается процентное содержание элементарного кремния; при увеличении давления кислорода и уменьшении скорости осаждения происходит доокисление монооксида кремния и образование высших окислов.

При осаждении SiO наблюдается явление возникновения пористости диэлектрических пленок. Пористость растет с увеличением давления остаточных газов или уменьшением скорости осаждения.

Эффективный контроль качества осаждаемой пленки из монооксида кремния обеспечивает получение конденсаторов с удельной емкостью до 10 000 пФ/см², с хорошими электрофизическими характеристиками; однако вероятность спонтанного появления коротких замыканий остается довольно большой, особенно в условиях повышенной влажности (интенсивность отказов порядка 10^{-5} ч⁻¹).

Близки по физическим свойствам к пленкам из SiO пленки из GeO, хотя значение ϵ у них в два раза выше, чем у SiO, а испарение материала происходит при температуре 800—900 °С, что положительно с технологической точки зрения. Однако электрическая прочность пленок из монооксида германия меньше, чем из монооксида кремния.

Некоторое распространение получили конденсаторы на основе халькогенидных стекол (ХГ-31, ХГ-32, ХГ-44, ИКС-24, Sb_2S_3). Температура испарения этих материалов невелика (400—700 °С), а величина ϵ , например в пленках Sb_2S_3 достигает 18—21. Однако конденсаторы очень чувствительны к влажности воздуха (полностью разрушаются через 5—7 суток при влажности 98%). Температурный диапазон работы ограничен —60—(+80 ÷ +100) °С. Сравнительные характеристики пленочных конденсаторов на основе трехсернистой сурьмы и монооксида германия приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Сравнительные характеристики пленочных конденсаторов на основе GeO и Sb_2S_3

Диэлектрик	$C_{уд} \times 10^{-8}, \frac{\mu F}{cm^2}$	ϵ	$tg \delta_0 \cdot 10^2$	$E_{пр} \cdot 10^{-6}, В/см$	ТКЕ $\cdot 10^4, 1/^\circ C$
GeO	10—15	10—12	1,0	0,5—0,8	3
Sb_2S_3	До 15	18—21	1,0	0,5—0,8	5

Испарение целого ряда тугоплавких окислов с высоким значением диэлектрической проницаемости из резистивного испарителя невозможно из-за реакции окисла с материалом испарения при высокой температуре и термической диссоциации. Так, при напылении TiO_2 из резистивного испарителя, нагретого до +1380 °С, в паровой фазе содержится только 10% TiO_2 , а 70% составляют молекулы титана. При температуре 2550 °С в парах над ThO_2 молекулы ThO_2 и ThO присутствуют в сравнимых количествах, в парах над HfO_2 — в основном HfO . Аналогична картина термического испарения ZrO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , MoO , WO_3 .

Для испарения тугоплавких материалов с малой степенью термической диссоциации, например SiO_2 , Al_2O_3 , применяют электронный луч. В табл. 3.7 приведены основные характеристики конденсаторов с диэлектриком SiO_2 и Al_2O_3 .

Стабильность этих конденсаторов та же, что и у конденсаторов на основе SiO .

Известно, что окислы некоторых вентильных металлов (тантала, титана, ниобия, циркония, алюминия и др.) легко образуются при их анодировании. При формировании

нии окисной диэлектрической пленки этим методом толщина ее соответствует формовочному напряжению, что очень важно для получения емкости заданного номинала. В табл. 3.8 приведены значения скорости роста и диэлектрической проницаемости окисной пленки металлов, применяющихся в микроэлектронике.

Таблица 3.7

Основные характеристики пленочных конденсаторов с диэлектриками SiO_2 и Al_2O_3 , нанесенными с помощью электронного луча

Диэлектрик	$C_{уд} \cdot 10^{-3}$, пФ/см ²	ϵ	$\text{tg } \delta_2 \times 10^3$	ТКЕ $\times 10^4$, 1/°C
SiO_2	8—20	4,2	0,2	0,8—1
Al_2O_3	6,5—20	8,8	0,8	3

Таблица 3.8

Значения диэлектрической постоянной и скорости роста окисной пленки металлов, применяющихся в микроэлектронике

Оксид	Скорость роста, Å/с	ϵ
Al_2O_3	11—14	8—9
Ta_2O_5	16—18	21—25
TiO_2	22—24	40—50
ZrO_2	27—28	25

На практике наиболее часто применяются конденсаторы, полученные анодированием пленок тантала. Совмещение вакуумно-термического метода изготовления резистивных и коммутационных слоев с катодным методом распыления Ta создает определенные неудобства. Поэтому и резистивные и коммутационные слои изготавливают обычно из тантала.

Удельная емкость конденсаторов на основе анодированного тантала может быть велика ($0,1 \div 0,2$ мкФ/см²), $\text{tg } \delta = 0,01$; $E_{пр} = (1 \div 2) \cdot 10^6$ В/см, ТКЕ = $(2 \div 3) 10^{-4}$ град⁻¹, однако частотный рабочий диапазон этих элементов невелик вследствие большого сопротивления нижней танталовой обкладки. Применение подслоя из проводящего материала (алюминия, золота) создает дополнительные трудности. Кроме того, следует отметить низкую устойчивость этих конденсаторов на площади более $0,1$ см² к катастрофическим отказам.

Конденсаторы на основе анодированного титана обладают еще большим значением удельной емкости, однако их устойчивость к катастрофическим отказам ниже, чем у конденсаторов на основе Ta_2O_5 .

В последнее время большое распространение получают конденсаторы на основе анодированного алюминия

благодаря воспроизводимости, простоте получения исходной металлической пленки и стабильности окисной пленки Al_2O_3 . Травление алюминия и Al_2O_3 не представляет трудностей; рисунок на плате может быть получен как масочным методом, так и методом избирательного химического травления. Высокое значение электропроводности обкладок позволяет создавать высокочастотные емкостные элементы. Система $Al-Al_2O_3$ отличается термодинамической устойчивостью во времени. Ниже приведены основные параметры конденсаторов на основе анодированного алюминия:

Удельная емкость, пФ/см ²	(30—50) · 10 ³
Напряжение формирования, В	100—150
Тангенс угла потерь (на частоте 1 кГц), %	0,4—1
ТКЕ, 1/°С	(390 ± 100) · 10 ⁻⁶

Изменение емкости после всего комплекса испытаний до 1%.

Наиболее полно требованиям, предъявляемым к диэлектрику пленочного конденсатора, удовлетворяют специально подобранные оксидные стекла.

Во-первых, вероятность смачивания конденсатом поверхности и как следствие вероятность формирования беспористой пленки повышается при увеличении числа компонентов испаряемой системы.

Во-вторых, поскольку в стеклах в первом приближении выполняется принцип аддитивности, это позволяет изменять плавно в широких пределах электрические, механические, тепловые и другие их характеристики путем подбора состава. В частности, электрическая прочность большинства стекол выше 10⁶ В/см; относительная диэлектрическая постоянная известных к настоящему времени стекол лежит в диапазоне 3—40, тангенс угла потерь достигает 10⁻⁴, коэффициент линейного теплового расширения (—50 ÷ +200) · 10⁻⁷ и т. д.

В третьих, стекло — это переохлажденная жидкость; его механические свойства плавно зависят от температуры, что допускает термоотжиг механических напряжений в пленках, залечивание дефектов при электротренировке изготовленных конденсаторов.

В табл. 3.9 приводятся основные параметры конденсаторов на основе боросиликатного и алюмосиликатного стекол.

Таблица 3.9

Основные эксплуатационные параметры пленочных конденсаторов на основе боросиликатного и алюмосиликатного стекол

Материал диэлектрика	Диапазон удельных емкостей, пФ/см ²	Рабочее напряжение, В	Электрическая прочность, В/см	ТКЕ · 10 ⁵ , град ⁻¹	tg δ × 10 ³	Частотный диапазон диэлектрика, МГц	Диапазон номиналов, пФ
Боросиликатное стекло	1 000 5 000 15 000	50 15 10	3 · 10 ⁶	3,5	1—1,5	До 300	1—2 тыс. 5—10 тыс. 15—30 тыс.
Алюмосиликатное стекло	15 000 30 000 50 000	12,6 10 6,3	2,5 · 10 ⁶ 3,5 · 10 ⁶ 4,5 · 10 ⁶	1,5	2—3	До 300	15—30 тыс. 30—60 тыс. 50—100 тыс.

Верхние обкладки тонкопленочных конденсаторов.

К верхним обкладкам конденсаторов предъявляются следующие требования:

1. Сопротивление верхнего электрода не должно быть заметно больше сопротивления нижнего электрода в целях избежания ухудшения частотной характеристики конденсатора.

2. Механические напряжения в верхней обкладке должны быть минимальными, поскольку они играют столь же существенную роль, что и в самом диэлектрике, так как силы напряжений в верхнем электроде приложены непосредственно к диэлектрику.

3. Материал верхнего электрода должен быть легкоплавким и не смачивать диэлектрик, чтобы при частичном пробое расплавленный материал верхнего электрода силами поверхностного натяжения мог вскрыть как область пробоя, так и рядом расположенные участки диэлектрика, тем самым как бы электрически отключив слабое место в конденсаторе.

3.5. Проводники

В тонкопленочной микросхеме (как и в любой другой электронной схеме) необходимо иметь систему проводников, или осуществлять тонкопленочный монтаж. Основные требования, предъявляемые к монтажу, — вы-

сокая проводимость, коррозионная стойкость и надежность соединения.

Самым распространенным материалом тонкопленочных проводников является золото с подслоем хрома, никрома или титана. Промежуточный слой обеспечивает высокую адгезию, а золото — нужную проводимость, высокую стойкость к коррозии, возможность пайки и сварки. Толщина золотых проводников обычно составляет 0,5—1 мкм.

В аппаратуре с менее жесткими требованиями к надежности в качестве проводников используются пленки меди или алюминия с подслоем хрома, никрома или титана, защищаемые никелем или золотом. Толщина медной или алюминиевой коммутации составляет несколько микрон, толщина никелевого или золотого покрытия — обычно десятые доли микрон.

Золотое или никелевое покрытие при использовании медных проводников играет защитную роль — увеличивает коррозионную стойкость — и одновременно обеспечивает возможность пайки и сварки. Алюминиевые проводники сами обладают достаточно высокой коррозионной стойкостью. Защитный слой никеля в данном случае служит для улучшения условий пайки. Если подсоединение активных элементов и внешних контактов осуществляется методом сварки, то пленки алюминия с подслоем металла (для увеличения адгезии) являются хорошими проводниками.

Одним из методов уменьшения сопротивления проводящих линий является метод погружения схемы в припой. В этом случае конденсаторы и резисторы необходимо защищать диэлектриком в целях избежания облуживания этих элементов.

Подгонка резисторов

Толстопленочные резисторы при хорошо отработанной технологии после обжига имеют разброс сопротивлений порядка $\pm 10\text{--}20\%$, а тонкопленочные — $5\text{--}10\%$. Такие резисторы, как правило, использоваться в микросхеме не могут, поэтому их необходимо подгонять до нужного номинального значения

Существующие методы подгонки позволяют производить ее с точностью до 1% и менее

В настоящее время применяются следующие основные методы подгонки механический; пескоструйный; высокочастотный; лазерный.

4.1. Механический метод

Подгонка резистора до нужного номинального значения осуществляется при помощи алмазного бора, вращающегося со скоростью 100 тыс. об/мин, путем фрезерования резистивной пленки.

Подгоняемое сопротивление соединено с эталоном в мостовую схему. При достижении необходимой величины подгоняемого сопротивления турбина отключается и процесс подгонки прекращается. Процесс подгонки одного резистора длится 20—30 с.

Этот метод при достаточной производительности и простоте используемого оборудования имеет ряд существенных недостатков — влагоустойчивость резистора уменьшается, так как зона обработки после подгонки не защищена пленкой, проникающая в резистор влага изменяет его сопротивление;

— при механической обработке часто образуются трещины, что в большинстве случаев ведет к браку и увеличению э. д. с шумов;

применение алмазного бора ограничивает возможность подгонки резисторов небольших номиналов (обычно они не превышают $1,4 \times 1,4$ мм), так как бор небольшого диаметра имеет недостаточную прочность

Тем не менее в ряде случаев этот метод может быть применен в силу простоты оборудования и достаточно высокой точности.

4.2. Пескоструйный (абразивный) метод

Подгонка осуществляется путем вырезания части резистора струей воздуха, несущего абразив. В качестве абразива обычно применяется окись алюминия, состоящая из частиц диаметром от 10 до 500 мкм

Количество материала, удаляемого с резистора за единицу времени, определяется типом абразивного порошка, давлением воздуха, потоком абразивных частиц, скоростью продвижения резистора под форсункой, формой форсунки, твердостью и толщиной материала резистора. Большинство из этих факторов можно поддерживать постоянными. Точность подгонки резистора зависит от скорости передвижения резистора под форсункой. Так, при увеличении скорости передвижения резистора с 25 до 100 мм/мин точность может умень-

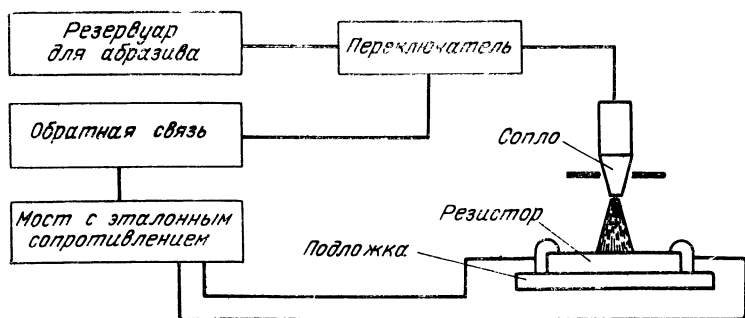


Рис. 18. Схема пескоструйной подгонки резисторов.

шиться в три раза. Снижение точности подгонки при увеличении скорости в первую очередь связано с инерционностью системы (с остановкой двигателя или перекрытия подачи абразива), однако это частично можно исправить за счет введения постоянной поправки. Проведенной экспериментальной проверкой установлено, что наиболее рациональный предел точности подгонки составляет 1%.

Этот метод обладает такими же недостатками, что и предыдущий, однако за рубежом в производстве толстопленочных схем он является основным. При абразивной подгонке нельзя обрабатывать резисторы, площадь которых меньше 3—4 мм², из-за размеров абразивной струи. Сложным является также необходимость удаления абразива во время подгонки.

При всех имеющихся недостатках большинство фирм, производящих толстопленочные микросхемы, применяет абразивный метод. Принципиальная схема метода пескоструйной подгонки показана на рис 18.

4.3. Лазерный метод

Лазерный метод подгонки резисторов из всех существующих методов, на наш взгляд, является наиболее прогрессивным. Он обладает следующими преимуществами:

1. Позволяет осуществлять подгонку резисторов размером менее 1 мм, так как диаметр луча лазера можно сделать минимальным.
2. Высокая скорость испарения материала резистора при воздействии луча лазера обеспечивает высокую производительность.
3. Место обработки сопротивления оплавляется стеклом, препятствующим проникновению в резистор влаги.
4. Инерционность системы при электронном управлении очень мала, что позволяет применить установку, имеющую более высокую точность подгонки, чем механическая и пескоструйная.

5 Оборудование, использующее принцип лазерной подгонки, обладает высокой надежностью, так как не имеет сложных механических устройств с быстровращающимися деталями (тем более в среде абразивной пыли)

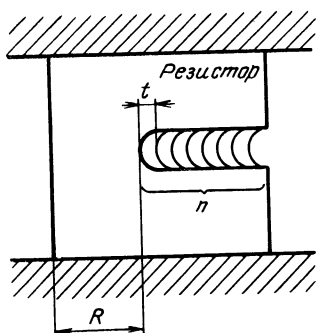


Рис. 19. Схема технологического процесса подгонки резисторов

6 При применении лазера с модулированной добротностью резонатора, генерирующего излучения длительностью несколько десятков наносекунд, испарение материала происходит лишь на глубину несколько микрон, что позволяет производить подгонку емкости конденсаторов за счет испарения верхней его обкладки

При лазерной подгонке, так же как и при пескоструйной и механической, у резистора удаляется (испаряется) часть проводящей пленки, что приводит к увеличению сопротивления

При подгонке твердотельным лазером, имеющим небольшую частоту подачи импульсов, дорожка подгонки

образуется последовательно наложенными друг на друга и частично перекрытыми лунками (рис. 19)

Резистор считается подогнанным, если увеличение сопротивления, приходящееся на один шаг (n) подгонки, не будет превышать величину допуска ($\pm \Delta$) на подгоняемый резистор, т.е. $\Delta R_n = R_n - R_{n-1} \leq \pm 2\Delta$, где R_n и R_{n-1} — величины сопротивления резистора после n и $n-1$ импульсов подгонки

Таким образом, в целях повышения производительности при импульсном режиме работы лазера желательно увеличивать шаг подгонки, однако это может привести к «переподгонке», т.е. к браку. По этой причине при импульсном режиме подгонки по мере приближения величины сопротивления к номинальному значению нужно уменьшать шаг подгонки, хотя это и снижает производительность

На установках с ручным управлением можно подгонять не более 150 резисторов/ч

Очевидно, при необходимости получения высокой производительности подгонки резисторов целесообразнее применять не твердотельные, а газовые лазеры. При автоматизации процесса производительность такой установки может быть доведена до 5—6 тыс. резисторов/ч.

4.4. Другие методы подгонки сопротивлений резисторов

Химический В этом случае горячая струя кислорода или водорода, направляемая на резистор, восстанавливает или окисляет проводящие компоненты резистора, тем самым увеличивая или уменьшая величину сопротивления

Электрохимический Этот метод использует электролиз слоя воды, покрывающий резистор. Выделяемый на поверхности резистора O_2 или H_2 (в зависимости от полярности) также восстанавливает или окисляет палладий.

Сборка гибридных интегральных микросхем

5.1. Монтаж активных элементов

После нанесения на подложку пассивных элементов на ней монтируются активные элементы (диоды, транзисторы или твердые схемы). Монтаж активных элементов, имеющих гибкие выводы, включает две основные операции: крепление элементов на подложке микросхемы и подсоединение внешних выводов активных элементов к пленочным контактным площадкам.

Технология крепления элементов должна обеспечивать ряд требований, предъявляемых к этой операции: высокую механическую прочность крепления, отсутствие напряжений в месте крепления, химическую стойкость и нейтральность материалов, применяемых для крепления, их высокую теплопроводность, низкую температуру образования и высокую рабочую температуру получающихся соединений.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили два метода крепления: при помощи эпоксидных компаундов и при помощи спаев. В первом случае переход активный элемент — подложка является электроизоляционным, во втором случае обеспечивается омический контакт.

Применение эпоксидных компаундов обусловлено тем, что эпоксидные смолы имеют минимальную усадку при отверждении, хорошую адгезию к различным материалам, не выделяют побочных продуктов, химически стабильны. Температура их полимеризации может быть выбрана в широком диапазоне значений, включая комнатную, путем подбора отвердителей. Эпоксидные смолы хорошо совмещаются с различными добавками, благодаря которым образующимся компаундам придают необходимую эластичность, увеличивают их теплопроводность, рабочую температуру, снижают степень усадки, подбирают необходимый температурный коэффициент линейного расширения.

Крепление при помощи спая чаще всего осуществляют за счет образования эвтектических сплавов между кристаллом полупроводника и слоем золота на микросхеме. Процесс пайки ведется в следующем порядке. Подложка с микросхемой подогревается на специальном столике до температуры, несколько превышающей температуру эвтектики. Температура эвтектики системы кремний — золото — 370 °С, германий — золото — 356 °С. Затем кристалл помещается на слой золота и прижимается с определенным усилием, в результате происходит взаимное растворение материала полупроводника и золота с образованием эвтектического сплава на границе раздела. В том случае, когда толщина пленки золота недостаточна, между нею и кристаллом помещают таблетку эвтектического сплава толщиной 15—20 мкм.

Подсоединение проволочных выводов к контактным площадкам микросхемы возможно различными методами, главными из которых являются термокомпрессионный и ультразвуковой.

Метод термокомпрессии основан на одновременном воздействии тепла и давления на область контакта пленочного элемента с присоединяемой проволокой. Усилия сжатия колеблются от 0,05 до 0,5 кг, длительность процесса — несколько секунд. Способы подведения тепла к месту соединения могут быть самые различные:

— нагрев подложки микросхемы на специальной печке;

— нагрев пуансона, с помощью которого осуществляется прижатие подсоединяемой проволоки к контактной площадке, путем подачи импульса тока через пуансон, в этом случае пуансон выполнен в виде V-образного электрода;

— прогрев непосредственно подсоединяемой проволоки путем подачи импульса тока через нее в месте контакта; пуансон в этом случае представляет собой два электрода, соединенных изолирующей прокладкой, образуя как бы один расщепленный электрод.

Метод ультразвуковой сварки основан на одновременном воздействии колебаний ультразвуковой частоты, возбужденных в свариваемых деталях, и давления в области сварки. Вибрации высокой частоты разрушают пленку окисла на поверхности раздела металлов в области сварки, делают поверхность раздела настолько чистой, что образуются металлургические спаи. Это явление аналогично

явлению захвата между несмазанными металлами при трении. Метод ультразвуковой сварки по сравнению с термокомпрессионным обеспечивает лучшее качество сварного соединения, меньшую температуру сварки, более широкий набор свариваемых металлов. Он позволяет также осуществлять сварку групповым способом.

При сборке активных элементов с «шариковыми» выводами применяется совместимое воздействие ультразвука, тепла и давления для обеспечения максимальной надежности и прочности соединения кристалла с микросхемой. Поскольку «шариковые» выводы не могут быть изготовлены совершенно одинаковыми по высоте в пределах одного кристалла (разновысотность достигает нескольких микрон), то для обеспечения надежной сварки всех выводов к контактным площадкам выводы и площадки покрывают мягким припоем толщиной также несколько микрон. Деформация припоя при подсоединении кристалла компенсирует разновысотность выводов. Наиболее перспективным припоем для медных выводов является индий, температура плавления которого 154 °С, а температура плавления сплавов меди с индием в месте контакта может достигать 700 °С. Схема монтажа активных элементов с «шариковыми» выводами дана на рис. 20.

Применение активных элементов с «шариковыми» выводами позволяет автоматизировать процессы сборки. К настоящему времени разработаны автоматы, осуществляющие сортировку кристаллов по функциональному назначению, размещение на микросхеме с необходимой ориентацией и надежную сварку. Производительности таких автоматов 5000—10 000 кристаллов/ч.

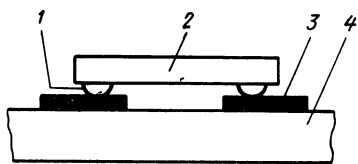


Рис 20 Схема монтажа активных элементов с «шариковыми» выводами

1 — жесткий вывод (шарик), 2 — активный элемент, 3 — контактная площадка, 4 — подложка

5.2. Герметизация гибридных микросхем

Трудоемкость процесса герметизации корпусом составляет почти одну треть от всей трудоемкости изго-

товления микросхемы. Качество герметизации в значительной степени влияет на надежность схемы, особенно в условиях длительного хранения и работы в тяжелых климатических условиях.

При герметизации металлостеклянными корпусами микросхема приклеивается к основанию корпуса эпоксидным компаундом, затем производится приварка крышки корпуса к основанию, как правило, либо контактной, либо холодной сваркой.

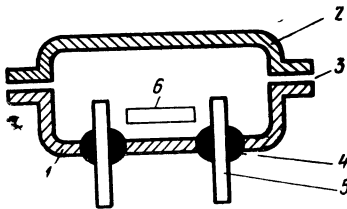


Рис. 21. Герметизация микросхемы металлостеклянным корпусом

1 — основание, 2 — крышка, 3 — место сварки или пайки, 4 — стекло, 5 — вывод, 6 — подложка

Конструкция металлостеклянного корпуса дана на рис. 21.

В основу контактной сварки положено сплавление двух металлов в зоне соприкосновения под давлением, разогрев металлов осуществляется за счет импульса тока через контакт.

Режим сварки (ток в импульсе, длительность импульса, давление) для каждого случая подбирается практически в зависимости от толщины свариваемых материалов, их площади и теплопроводности. Герметизация ГИМ производится на автоматическом оборудовании в атмосфере инертного газа. Перед загрузкой корпусов в сварочный автомат поверхность соприкосновения крышек и оснований тщательно очищается.

В основу холодной сварки положена пластическая деформация свариваемых металлов при комнатной температуре под действием большого давления, при которой чистые поверхности вступают в тесный контакт друг с другом и образуют цельнометаллические соединения с непрерывной кристаллической структурой. Давление, необходимое для сварки, составляет обычно 400—500 кг/см². Контактлируемые поверхности должны быть тщательно очищены от окисных, жировых и других загрязнений. С этой целью поверхность свариваемых деталей никелируется или хромируется тонким слоем. Во время пластической деформации под давлением нанесенный слой растрескивается, образуя отдельные островки, а чистые слои основного металла входят в соприкосновение друг с другом и образуют прочное соединение.

Холодную сварку можно осуществлять как на одно-

родных, так и на разнородных материалах. Хорошие результаты получаются при сварке пар медь—медь, сталь—сталь, медь — сталь, медь — ковар.

При герметизации металлокерамическим корпусом существенное значение имеет выбор материала металлической крышки для обеспечения согласования его температурного коэффициента линейного расширения с температурным коэффициентом линейного расширения материала керамического основания. Обычно в качестве керамического основания используется поликор, тогда материалом для металлической крышки может быть медь, никель, ковар, титан.

Соединение крышки с основанием осуществляется методом пайки, для этого керамическое основание в месте контакта металлизуют молибденово-марганцевой пастой с последующим осаждением слоя никеля или меди. Для получения вакуумно-плотного шва применяют припой на основе серебра с температурой пайки 300—400 °С.

5.3. Методы контроля герметичности корпусированных ГИМ

Негерметичность корпуса количественно характеризуют скоростью натекания газа в объем корпуса при разности давлений внутри и снаружи корпуса в 1 ат

Наиболее распространенными методами контроля герметичности корпусов являются.

- вакуумно-жидкостной;
- по скорости натекания гелия

При контроле герметичности по скорости натекания гелия используется большая подвижность его атомов и способность проникать в малейшие отверстия. При этом необходимо либо герметизировать корпусы в атмосфере гелия, либо производить опрессовку в среде гелия. После этого корпусы исследуют с помощью масс-спектрометрического гелиевого течеискателя (например, ПТИ-6). Масс-спектрометрический метод позволяет выявлять течи до 10^{-6} — 10^{-7} ат \times $\text{см}^3/\text{с}$

Вакуумно-жидкостной метод позволяет выявлять течи в корпусе свыше $1 \cdot 10^{-2}$ ат \cdot $\text{см}^3/\text{с}$. При этом корпусы помещают в стеклянную камеру с керосином и создают в ней вакуум порядка 10^{-3} ат. Если в исследуемом корпусе есть течь, то вследствие разницы давлений внутри корпуса и вне его газ, находящийся в корпусе, будет выходить наружу. Место течи указывают пузырьки газа.

Описанные методы дополняют друг друга. Последний метод является простым и позволяет оперативно получить информацию о наличии грубой течи. Чаще всего этой информации бывает достаточно. При более жестких требованиях к герметичности корпуса проводят дополнительный контроль с помощью гелиевого течеискателя.

5.4. Бескорпусная герметизация ГИМ

Бескорпусная герметизация осуществляется путем обволакивания интегральной схемы полимерным материалом. Применение бескорпусной герметизации вместо корпусной дает выигрыш в габаритах и весах примерно в 1,5 раза и снижение стоимости примерно на 30%. Применяемые для бескорпусной герметизации материалы должны обеспечивать нормальную работу ГИМ во всем диапазоне температур, предохранять ее от механических и климатических воздействий. Наибольшее распространение в качестве герметиков получили кремнеорганические вещества. Но даже и они не обеспечивают абсолютную влагозащиту, которая определяется диффузионными константами материала и его геометрическими размерами. Возможно попадание влаги также через трещины, поры и выводы.

Необходимо заметить, что пленочные (пассивные) элементы ГИМ в подавляющем большинстве не нуждаются в защите от климатических воздействий. Применение герметизации связано с обеспечением работоспособности прежде всего полупроводниковых активных элементов. В последнее время в технологию изготовления полупроводниковых приборов широко внедряется защита их пленками нитрида кремния, что намного увеличивает устойчивость бескорпусных активных элементов к воздействию внешней среды. Непрерывное совершенствование способов защиты бескорпусных активных элементов и полимерных материалов-герметиков позволяет считать, что этот метод будет основным в ближайшем будущем.

Благодаря многочисленным отечественным и зарубежным исследованиям технология гибридных интегральных микросхем способна реализовать любую электронную схему, у которой диапазон номиналов резисторов находится в пределах от тысячных долей ома до десятков мегаом, диапазон номиналов конденсаторов — от десятых долей до сотен тысяч пикофарад, максимальные номиналы индуктивностей — до десятков микрогенри.

Средние габаритные размеры пленочных резисторов — $2 \cdot 10^{-3}$ см², конденсаторов — $10^{-3} \div 1$ см². Плотность размещения активных и пассивных элементов в ГИМ достигает 100—200 см³ при масочном и фотолитографическом методах создания конфигурации и до 300—500 см⁻³ — при электроннолучевом.

Ниже приведем сравнительные данные по плотности монтажа в блоке аппаратуры (элемент/см³) для различных конструктивно-технологических методов:

На полупроводниках с печатным монтажем	1—3
На микромодулях	10—15
На ГИМ	50—100

Надежность ГИМ, оцененная по результатам испытаний при предельной положительной температуре в статическом режиме работы характеризуется следующими показателями:

1965 г.	10^{-7} 1/ч
1967 г.	10^{-8} 1/ч
1970 г.	10^{-9} 1/ч

Вместе с тем известно, что показатели надежности ГИМ, соответствующие реальным условиям эксплуатации, на один-два порядка выше показателей, соответствующих предельным условиям эксплуатации. Высокий уровень интеграции ГИМ и их высокая надежность стимулируют развитие новых методов оценки качества, так как традиционные методы «типовых» испытаний становятся чрезвычайно дорогостоящими и малоэффективными.

Список литературы

1. Мэдленд Г. Р. и др. Интегральные схемы. Основы проектирования и технологии. Пер. с англ. Под ред. К. И. Мартюшова. М., «Сов. радио», 1970
2. Мартюшов К. И., Зайцев Ю. В. Технология производства резисторов. М., «Высшая школа», 1972.
3. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. М., «Сов. радио», 1971.
4. Данилин Б. С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. М., «Энергия». 1972.
5. Мартюшов К. И., Зайцев Ю. В., Тихонов А. И. Методы расчета резисторов. М., «Энергия», 1971
6. Гальперин Б. С. Непроволочные резисторы. М., «Энергия», 1968.
7. Аренков А. Б. Печатные и пленочные элементы радиоэлектронной аппаратуры. М., «Энергия» 1971.
8. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология и оборудование производства полупроводниковых приборов. М., «Судостроение», 1971.
9. Пленочная микроэлектроника. Под общ. ред. Л. Холлэнда. М., «Мир», 1968.
10. Суйковская Н. В. Химические методы получения тонких прозрачных пленок. М., «Химия», 1971
11. Физика тонких пленок [Сборник статей]. Под общ. ред. Г. Хасса. М., «Мир», 1971.
12. Микроэлектроника [Сборник статей]. Под ред. Ф. В. Лукина. Вып. 4. М., «Сов. радио», 1971
13. Микроэлектроника [Сборник статей]. Под ред. Ф. В. Лукина. Вып. 5. М., «Сов. радио», 1972.
14. Хирс Д., Паунд Г. Испарение и конденсация. М., «Металлургия», 1966.
15. Черепнин Н. В. Основы очистки обезгаживания и откачки в вакуумной технике. М., «Сов. радио», 1967
16. Юнг Л. Анодные оксидные пленки. М., «Энергия», 1967
17. Уэрт У., Томсон Р. Физика твердого тела. М., «Мир», 1969
18. Павленко К. И. Надежность радиоэлектронной аппаратуры при циклическом и непрерывном режимах использования. М., «Сов. радио», 1971.
19. Барканов Н. А., Попов В. Н. Микромодули. М., «Сов. радио», 1971.
20. Малинин Р. М. Резисторы. М., «Энергия» 1965
21. Левин С. Н. Основы полупроводниковой микроэлектроники. М., «Сов. радио», 1966
22. Кхамбата А. Большие интегральные схемы. М., «Мир», 1971
23. Чопра К. Л. Электронные явления в тонких пленках. М., «Мир», 1972
24. Осипов К. А. Аморфные и ультрадисперсные кристаллические материалы. М., «Наука», 1972.
25. Васильев А. В. Микроминиатюризация военной электронной аппаратуры. М., «Оборонгиз», 1969
26. Иванов-Есипович Н. К. Инженерные основы пленочной микроэлектроники. М., «Энергия», 1968.
27. Свистунов Ю. А., Солдатенков В. А. Микроэлектроника. М., «Знание», 1970

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Конструкция гибридных интегральных микросхем	6
Глава 2. Технология толстопленочных гибридных интегральных микросхем	12
2.1. Особенности конструкции толстопленочных ГИМ	12
2.2. Пасты	13
2.3. Трафареты	16
2.4. Нанесение паст на подложку	17
2.5. Термическая обработка паст	18
Глава 3. Технология тонкопленочных микросхем	22
3.1. Методы нанесения тонких пленок	22
3.2. Методы получения тонких пленок заданной конфигурации	25
3.3. Резисторы	31
3.4. Конденсаторы	39
3.5. Проводники	50
Глава 4. Подгонка резисторов	52
4.1. Механический метод	52
4.2. Пескоструйный (абразивный) метод	52
4.3. Лазерный метод	53
4.4. Другие методы подгонки сопротивлений резисторов	54
Глава 5. Сборка гибридных интегральных микросхем	55
5.1. Монтаж активных элементов	55
5.2. Герметизация гибридных микросхем	57
5.3. Методы контроля герметичности корпусированных ГИМ	59
5.4. Бескорпусная герметизация ГИМ	60
Список литературы	62

Сергеев В. С., Воженин И. Н.

С597 Интегральные гибридные микросхемы. М., «Сов. радио», 1973.

64 с. с ил. (Массовая библиотека инженера «Электроника»)

Излагаются основные вопросы проектирования и изготовления гибридных пленочных микросхем. Приводится технологическая схема изготовления микросхем и достаточно полно описывается технология ее пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей, соединений), а также технология сборки и герметизации микросхемы в целом. Дается краткое описание основного технологического и измерительного оборудования. Указываются области применения таких схем и перспективы развития данного направления.

Брошюра предназначена для инженеров электронной техники, радионинженеров и студентов радиотехнических вузов.

С $\frac{3312-029}{046(01)-73}$ 75-72

6Ф0.32

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ СЕРГЕЕВ
ИВАН НИКИТИЧ ВОЖЕНИН

Интегральные гибридные микросхемы

Редактор М М Лисина
Художественный редактор З Е Вендрова
Технический редактор З Н Ратникова
Корректор Н Н Алабина

Сдано в набор 10/X 1972 г
Т-00448 Формат 84×108^{1/2}₃₂
Объем 3,36 усл. печ. л.
Тираж 22 000 экз.

Подписано в печать 6/II 1973 г.
Бумага машиномелованная
3,311 уч.-изд. л.
Цена 17 коп.

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, п/я 693

Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

17 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО • СОВЕТСКОЕ РАДИО •

