

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОСБОРОК

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 11.03.03 и 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств

САМАРА
Издательство Самарского университета
2020

ISBN 978-5-7883-1552-2

© Самарский университет, 2020

УДК 621.382.049.77(075)

ББК 32.844.1я7

Т384

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. Д. П. Т а б а к о в,
д-р техн. наук, доц. А. И. Д а н и л и н

Пиганов, Михаил Николаевич

Т384 **Технология микросборок:** учебное пособие / *М.Н. Пиганов, М.П. Калаев, А.М. Телегин, К.И. Сухачев*; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 1 CD-ROM (2,7 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-7883-1552-2

Дан анализ современной технологии микросборок (МСБ). Приведены общие принципы и основные рекомендации, необходимые при разработке технологических процессов для производства тонкопленочных, толстопленочных и многослойных плат микросхем и микросборок, типовые технологические процессы; применяемые материалы и основное оборудование; вопросы технологического контроля параметров элементов микросборок и готовых изделий.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 11.03.03 и 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств», изучающих дисциплину «Технология микросборок». Может быть использовано не только при изучении теоретического материала по технологии микросборок, но и при выполнении курсовых проектов по дисциплине «Конструирование интегральных микросхем».

Подготовлено на кафедре конструирования и технологии электронных систем и устройств.

УДК 621.382.049.77(075)

ББК 32.844.1я7

Минимальные системные требования:

PC, процессор Pentium, 160 МГц;

Microsoft Windows XP и выше; мышь; дисковод CD-ROM;

Adobe Acrobat Reader.

© Самарский университет, 2020

Редактор А.С. Никитина
Компьютерная верстка А.С. Никитиной

Подписано для тиражирования 16.11.2020.
Объем издания 2,7 Мб.
Количество носителей 1 диск.
Тираж 10 экз.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Определения и основные технологические методы, применяемые в производстве ГИС, БГИС, МСБ, и их взаимосвязь	5
2. Технологические маршруты производства тонкопленочных плат микросборок	23
2.1. Материалы для тонкопленочных плат МСБ	23
2.2. Технологические способы формирования конфигураций пленочных элементов	40
2.3. Технология изготовления резистивных тонкопленочных плат МСБ с применением фотолитографии	59
2.4. Технологический маршрут изготовления резистивно-емкостных и тонкопленочных плат МСБ методом термического испарения через свободные маски	76
2.5. Основные типы вакуумных установок и линий	85
2.6. Измерение и контроль параметров тонких пленок	97
2.7. Организация производства тонкопленочных ГИС, БГИС и МСБ	113
3. Технологические маршруты производства толстопленочных плат МСБ	117
3.1. Материалы толстопленочных плат МСБ	117
3.2. Трафаретная печать и термообработка паст	131
3.3. Технологические маршруты производства толстопленочных плат микросборок на стальных эмалированных подложках	142
4. Технологический маршрут изготовления многослойных плат микросборок	149
5. Технологические процессы сборки и монтажа микросборок	164
5.1. Крепление подложек и компонентов	164
5.2. Присоединение выводов компонентов	172
Список использованных источников	188

1. Определения и основные технологические методы, применяемые в производстве ГИС, БГИС, МСБ, и их взаимосвязь

Микроэлектронная технология развивалась путем обобщения многих технологических приемов, ранее используемых в технологии производства РЭА, в частности в производстве дискретных полупроводниковых приборов и при изготовлении пленочных покрытий. На начальных этапах развития электронной техники, когда основными компонентами радиоэлектронных средств служили резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, реле, электронные лампы и соединяющие их проводники, технология развивалась по пути производства и обработки различных диэлектрических, проводящих материалов, соединения их между собой для создания конструкций приборов и устройств. В соответствии с растущими потребностями совершенствовалась и специализировалась технология производства пассивных компонентов: при производстве конденсаторов уже применялись многие диэлектрические и проводящие материалы, в производстве проводов совершенствовалась технология протяжки металлов и нанесения на них изоляционных материалов. Аппаратура собиралась из отдельных компонентов, которые механически укреплялись на металлических панелях и электрически соединялись между собой с использованием проволочного жгутового монтажа с помощью разъемов, пайки, сварки. При сборке устройств важное место занимала технология создания контактов.

Позднее были разработаны технологии печатных плат, микромодулей, интегральных микросхем (ИМС) и микросборок (МСБ), имеющие исключительно важное значение для производства современных радиоэлектронных средств.

Термин «технология» произошел от греческих слов техоп – искусство, мастерство, умение и λογος – наука, т. е. переводится как наука о мастерстве. Этот термин многозначен. В широком

смысле он означает совокупность приемов, методов и способов получения и переработки сырья, обработки материалов, полуфабрикатов или изделий, осуществляемых с целью получения конечного продукта или изделия. Технология производства изделий микроэлектроники базируется на способах изменения формы, размеров, физических и химических свойств, состава и структуры исходных материалов.

В более узком смысле этим термином обозначают технологические операции, являющиеся частью процесса производства изделий, а также комплект технологической документации (маршрутные и технологические карты, технологические инструкции и т. п.), подробно описывающей этапы изготовления и позволяющей их воспроизвести. Наконец, технологией называется научная или техническая дисциплина, которая занимается выявлением сущности и закономерностей механических, физических, химических и других явлений с целью совершенствования существующей и разработки, и внедрения в производство, новой более эффективной технологии каких-либо изделий, например: технология машиностроения, технология микроэлектроники, технология полупроводников. Показателями эффективности технологии являются: удельный расход сырья на единицу продукции; процент выхода годных изделий и их качество; уровень производительности труда; затраты на производство и себестоимость продукции.

Производство изделий микроэлектроники включает определенный ряд последовательно и параллельно проводимых технологических операций, выполняя которые постепенно из исходных материалов получают готовые изделия. Технологическая операция – это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте. Она характеризуется целенаправленным изменением исходного объекта (заготовки или полуфабриката) в процессе выполнения последовательных рабочих приемов – переходов. Технологическим переходом называется законченная часть технологической операции, характеризующаяся постоянством приме-

няемого инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке. В процессе выполнения каждой технологической операции происходят качественные изменения обрабатываемых объектов микросборок.

В зависимости от обрабатываемого объекта различают основные и вспомогательные технологические операции. Если обработке подвергаются объекты, которые при завершении производственного процесса преобразуются в требуемое изделие, то такие обработки относятся к основным операциям. Технологические операции, выполняемые над вспомогательными объектами, называются вспомогательными. К ним относятся, например, подготовка травителей, очистка оснастки, осушка газов, подготовка поверхности подложки, создание определенного давления в рабочей камере вакуумной установки. Вспомогательные операции являются частью производства, и от качества их выполнения в не меньшей степени, чем от качества выполнения основных операций, зависит качество готовых изделий.

Эффективным средством повышения качества и процента выхода годных микросхем является контроль отсутствия дефектов после выполнения технологических операций. Поэтому в технологический производственный процесс вводят контрольные операции. Количество контрольных операций определяется типом и сложностью изделий.

Технология производства интегральных микросхем и микросборок включает большое число разнообразных по своей физико-химической природе операций, проводимых в вакууме, газах, жидкостях и на воздухе. Количество операций в ряде случаев достигает до нескольких сотен.

Технологический процесс – это часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства. Технологический процесс изготовления микросхемы и МСБ содержит определенное, по возможности оптимальное, число технологических операций, рас-

положенных в определенной последовательности и обеспечивающих экономически обоснованное получение микросхем заданной конструкции с заданными электрофизическими параметрами. В массовом и серийном производстве применяют хорошо отработанные, проверенные типовые технологические процессы, доказавшие надежность микросхем в процессе эксплуатации. Такие технологические процессы характеризуются единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками.

Одну и ту же технологическую операцию можно реализовать различными (по физико-химической природе) технологическими методами. Например, технологическую операцию осаждения материала на поверхность подложки можно осуществить термическим испарением, ионно-плазменным распылением и химическими методами.

В соответствии с разделением производства на технологические участки различают следующие методы обработки: механические, химические, термические, фотолитографические, элионики (обработка электронным и ионным лучами), сборки, герметизации и др.

Различают групповые и индивидуальные технологические методы. При групповых методах одновременной обработке подвергается не один образец, а целая партия. Обработка партии в одинаковых технологических условиях позволяет уменьшить разброс параметров от образца к образцу и увеличить производительность технологического процесса.

Технологические процессы производства ГИМС и МСБ, как правило, представляют собой совокупность групповых и индивидуальных методов обработки. Химическую обработку, отжиг подложек осуществляют групповым методом; операции контроля и разделения подложек на платы гибридных интегральных микросхем проводят индивидуальным методом. Поскольку на одной

подложке формируют большое число микросхем, то индивидуальные методы обработки подложек являются групповыми по отношению к каждой отдельной микросхеме. Операции монтажа и сборки микросхемы в корпус, контроль на функционирование являются чисто индивидуальными.

Выше использовались термины «интегральная микросхема», «микросборка» и другие. Дадим их определения.

Интегральная микросхема (микросхема) – это конструктивно законченное микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования информации, содержащее совокупность электрически связанных между собой электрорадиоэлементов (транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и др.), изготовленных в едином технологическом цикле. Термин «интегральная микросхема» отражает суммирование, объединение значительного числа электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и соединяющих их проводников в единую конструкцию (конструктивная интеграция), выполнение функций преобразования более сложных по сравнению с функциями отдельных ЭРЭ (схемотехническая интеграция), создание одновременно всех ЭРЭ и межэлементных соединений в едином технологическом цикле (технологическая интеграция). Микросхемы изготавливают групповым методом по материалосберегающей технологии, тиражируя одновременно в одной партии от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч микросхем.

По конструктивно-технологическому исполнению микросхемы делят на три группы: полупроводниковые, пленочные и гибридные. В полупроводниковой интегральной микросхеме все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности полупроводниковой подложки. Элемент интегральной микросхемы – это ее неотделимая составная часть, выполняющая функцию какого-либо электрорадиоэлемента. Поэтому транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы микросхемы называют интегральными, в отличие от отдельно изготавливаемых транзисто-

ров, диодов, конденсаторов, резисторов, которые в этом случае называют дискретными.

В пленочной интегральной микросхеме все элементы и соединения между ними выполнены в виде пленок на поверхности диэлектрической подложки. В зависимости от толщины пленок и способа создания элементов микросхемы подразделяют на тонко- и толстопленочные. К первым относят микросхемы, толщина пленок в которых не превышает 1 мкм. Тонкопленочные элементы формируют различными методами: термического испарения и ионно-плазменного распыления материалов в вакууме, электрохимического осаждения из растворов, химического осаждения из газовой фазы.

В толстопленочных интегральных микросхемах толщина пленок составляет 10...70 мкм; толстые пленки наносят на подложку одним лишь методом – методом трафаретной печати. Толстопленочная интегральная микросхема – микросхема в которой пассивные элементы, соединительные проводники и контактные площадки выполнены методом трафаретной печати с использованием различных паст на поверхности керамической подложки.

В настоящее время методами пленочной технологии реализуются только пассивные элементы микросхем и МСБ – резисторы, конденсаторы и индуктивности. Остальные элементы (диоды, транзисторы и т.д.) заменяются дискретными элементами. Такая микросхема называется пленочной гибридной интегральной микросхемой (ГИС). В зависимости от сложности и степени интеграции различают два вида микросхем: гибридная интегральная схема (ГИС) и большая гибридная интегральная схема (БГИС).

В ГИС и БГИС в качестве активных электорадиоэлементов используются навесные бескорпусные дискретные полупроводниковые приборы или полупроводниковые интегральные микросхемы. Довольно часто в составе гибридной микросхемы используют не только пленочные, но и миниатюрные бескорпусные дискретные конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности. Их назы-

вают навесными компонентами. Этим подчеркивается, что они изготавливаются отдельно и представляют собой самостоятельные изделия, которые могут приобретаться изготовителем гибридных микросхем как покупные изделия.

Частью конструкции гибридной микросхемы является ее подложка. Она выполняет функции: механического основания, изоляции элементов друг от друга, теплоотвода. Подложки выпускаются в виде тонких прямоугольных пластин.

Для гибридных микросхем используют подложки из стекла, стеклокристаллического материала (ситалла) и керамики. Часть подложки, отведенную под одну микросхему, отделенную от других частей вместе со сформированными на ней элементами, в пленочной технологии называют платой.

По применяемости в аппаратуре различают микросхемы широкого и частного применения. К последним относятся микросхемы, предназначенные для использования в конкретной аппаратуре и изготавливаемые непосредственно на предприятии, ее производящем.

В ряде случаев разработчики конкретной РЭА для улучшения показателей ее миниатюризации изготавливают микросборки, в состав которых входят элементы, компоненты, интегральные микросхемы и другие ЭРЭ.

Микросборка (МСБ) – микроэлектронное изделие типа ГИС или БГИС, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) полупроводниковых интегральных микросхем (корпусированных и бескорпусных) и других радиоэлементов в различных сочетаниях, разрабатываемое и изготавливаемое разработчиками конкретной радиоэлектронной аппаратуры для улучшения показателей ее миниатюризации, надежности и технологичности.

По технологии производства она не отличается от гибридных интегральных схем или больших ГИС. Как правило по высокой степени интеграции или большой функциональной сложности МСБ соответствует БГИС. Однако микросборку изготавли-

вают специально для конкретной МЭА. В отличие от ГИС и БГИС, представляющих собой самостоятельные законченные изделия общего применения, МСБ являются изделиями на уровне полуфабрикатов. Потребность в них возникла для улучшения показателей уровня микроминиатюризации МЭА. В зависимости от степени интеграции МСБ может выполнять функции субблока, блока или всего устройства. Таким образом, микросборки являются микроэлектронными изделиями частного применения. В состав МСБ в качестве компонентов могут входить все виды изделий, перечисленные выше. В ряде случаев разработка микросборок диктуется необходимостью обеспечения хорошего теплоотвода.

По конструктивным признакам, в частности по составу, МСБ разделяют на три основные группы: простые, составные, комбинированные.

Простая МСБ – это микроэлектронное изделие (полуфабрикат) типа ГИС (в соответствии с определением МСБ), выполненное на одном основании и не содержащее пересечений, кроме перемычек, число которых не превышает $N \leq 10$. Простую МСБ применяют при создании МЭА по методу непрерывной микросборки или функционально-узловому методу.

Простые микросборки представляют собой плату с пассивными пленочными элементами: резистивными, емкостными и проводящими, на которой методами пайки, сварки и приклейки закреплены и смонтированы компоненты, входящие в состав схемы. В виде простых МСБ могут быть реализованы также прецизионные схемы, которые нуждаются в функциональной подгонке на завершающем этапе сборки и монтажа.

Составная МСБ – это микроэлектронное изделие типа ГИС (в соответствии с определением МСБ), состоящее из нескольких ГИС или простых МСБ и других устройств функциональной электроники, смонтированных на жестком или гибком основании. Причем отдельные простые МСБ могут быть выполнены по различным технологическим маршрутам.

Комбинированная МСБ – это микроэлектронное изделие, состоящее из нескольких простых и составных МСБ, которое проектируют по конструктивно-технологическим признакам с учетом функционального назначения, а элементы конструкции располагают как в плоскости, так и на разных уровнях на основании с многоуровневой разводкой. Комбинированная МСБ выполняет сложные функции и может содержать цифровые и аналоговые схемы.

Дополнительным отличительным признаком МСБ является наличие коммутации проводящих элементов различных уровней конструкции в едином технологическом процессе их производства, например, путем сквозной металлизации отверстий при формировании проводящих пленок. Коммутационные схемы с многоуровневой разводкой характеризуются высокой степенью интеграции и могут быть выполнены на жестком или гибком основании, а также в виде удачного их сочетания, в том числе с использованием специальных пакетов – многослойных наборов из гибкой ленты с металлизацией, смонтированных на жесткой плате.

На рис. 1 и 2 показаны микросборки на жестких основаниях.

Технология специализированных микросхемных изделий, к которым относятся ГИС, БГИС и МСБ, характеризуется двумя направлениями:

- Применение типовых отработанных технологических процессов и стандартного технологического оборудования. Это обеспечивает быстрое освоение производства новых изделий, воспроизводимость их параметров, стабильность рабочих участков и малые затраты на отработку технологии.

- Освоение и внедрение новых технологических процессов или операций вследствие возрастания требований, определяемых более жесткими техническими условиями на разрабатываемые изделия. Освоение передовой технологии сопряжено с приобретением нового и модернизацией существующего оборудования, и отработкой технологии, что отдалает создание новых изделий.

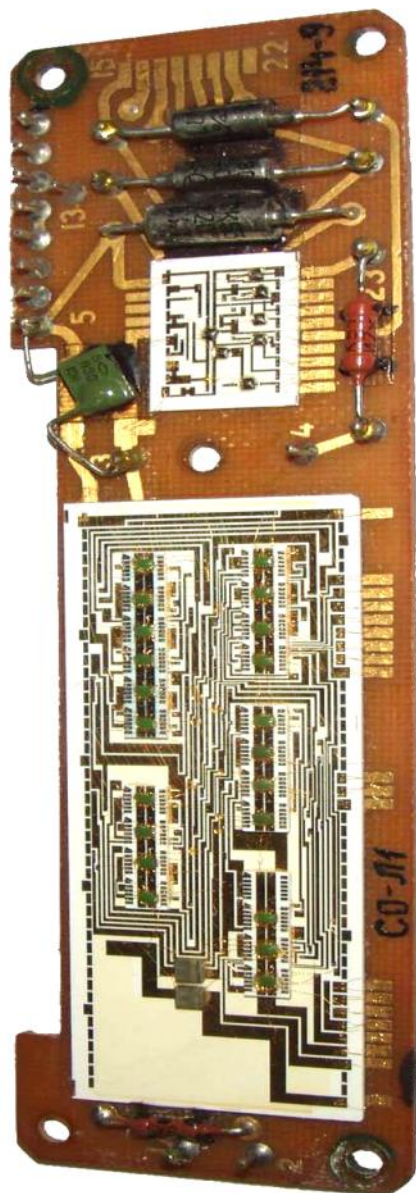


Рис. 1. Микросборка на жесткой плате



Рис. 2. Микросборка составная

Основу изготовления ГИС, БГИС и МСБ составляют два технологических метода производства: толстопленочная и тонкопленочная технологии. Эти технологические методы принципиально отличаются как по технологическим маршрутам изготовления схем, так и по их характеристикам и назначению. В табл. 1 приведены сравнительные характеристики двух названных методов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики технологических методов

Технологический вариант	Преимущества	Недостатки
	<ul style="list-style-type: none"> – высокая достижимая точность и идентичность номиналов и параметров; – высокая стабильность; – малое удельное сопротивление проводников; – широкий диапазон номиналов пассивных элементов; – возможность контроля параметров пленок в процессе напыления; – возможность применения подгонки 	<ul style="list-style-type: none"> – выше стоимость подготовки производства
Толстопленочная технология	<ul style="list-style-type: none"> – высокая допустимая мощность; – широкий диапазон номиналов элементов; – возможность создания многоуровневых схем; – простота технологии; – не требует вакуума; – возможность применения подгонки 	<ul style="list-style-type: none"> – низкая точность и стабильность параметров; – малая степень интеграции; – большое сопротивление проводников; – невозможность контроля параметров в процессе технологии

При производстве ГИС, БГИС и МСБ необходимо исходить из указанных направлений и вариантов технологий. Отдельные укрупненные схемы технологических процессов изготовления ГИС, БГИС и МСБ приведены на рис. 3, 4 и 5, которые характеризуют сложность состава и степень интеграции изделия. Сравнение

приведенных укрупненных схем технологических процессов показывает однотипность основных технологических операций изготовления пленочных плат.

Укрупненная схема технологического процесса производства ГИС (рис. 3) представляет собой изготовление групп пленочных элементов и пленочной коммутации на изоляционных подложках, подгонку, отбраковку плат с группами пленочных элементов и монтаж на платах бескорпусных компонентов (активных и пассивных элементов, полупроводников ИС и БИС). Перед герметизацией в корпус собранные платы подвергаются функциональной подгонке.

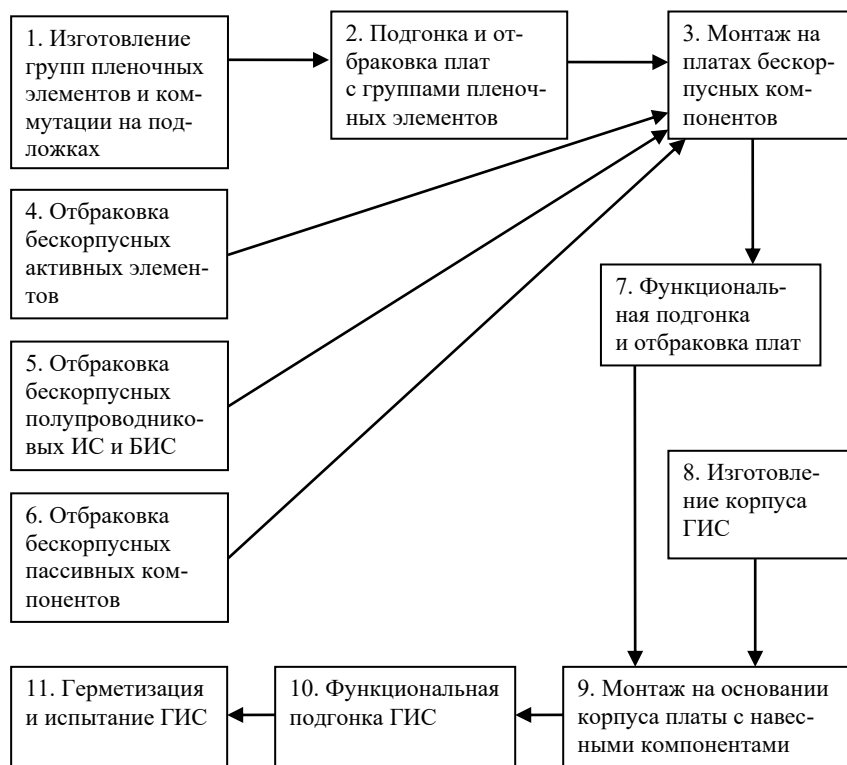


Рис. 3. Укрупненная схема технологического процесса изготовления ГИС

Отличием схемы технологического процесса производства БГИС (рис. 4) является изготовление базовой n-слойной пленочной коммутации и монтаж на этой плате как плат с группами пленочных и навесных элементов, так и отдельных бескорпусных компонентов (активных и пассивных элементов, полупроводниковых ИС и БИС). Схема технологического процесса производства микросборок (рис. 5) более сложная, это связано с наличием корпусированных полупроводниковых ИС и БИС и пассивных элементов. Причем корпусированные компоненты устанавливают только на базовую n-слойную плату и на основание корпуса (или общего каркаса) микросборки.



Рис. 4. Укрупненная схема технологического процесса изготовления БГИС

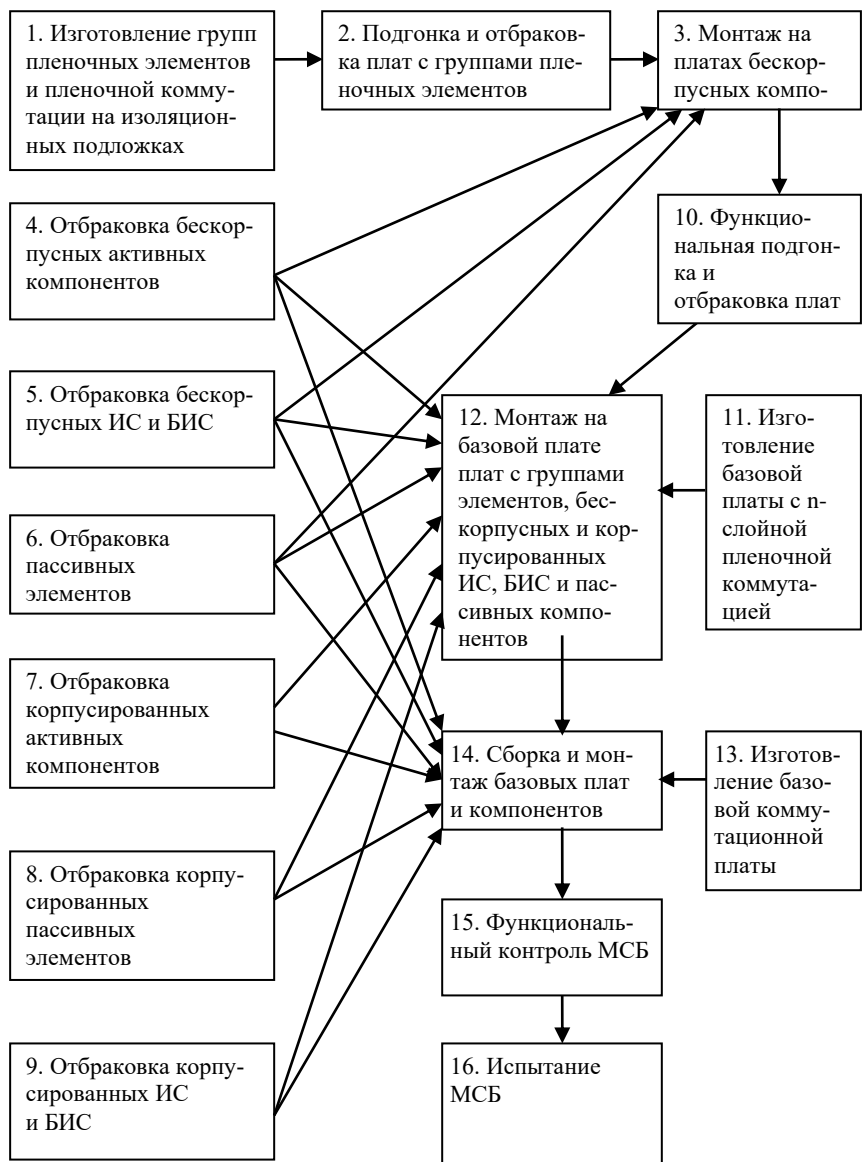


Рис. 5. Укрупненная схема технологического процесса изготовления МСБ

Укрупненные схемы технологического процесса изготовления БГИС и МСБ, представленные на рис. 4 и 5, могут иметь много модификаций. В частности, в корпусе можно монтировать только одну плату с элементами или несколько базовых плат; можно уменьшать или увеличивать число операций монтажа навесных элементов, число операций подгонки и т. д.

Некоторые процессы и операции не являются специфичными для технологии специализированных микросхем и МСБ. Это относится к изготовлению корпусов, отбраковке навесных элементов и отчасти к герметизации, испытаниям и функциональной подгонке.

Характерным для технологии специализированных микросхем и МСБ является: изготовление групп пленочных пассивных элементов и пленочной коммутации на изоляционных подложках; групповая и индивидуальная подгонка пленочных элементов; сборка и монтаж ГИС, БГИС и МСБ.

Основным преимуществом технологии ГИС, БГИС и МСБ является разделение и независимость основных технологических операций. Это позволяет обоснованно применять более простые модели для оценки качества технологии и использовать широкие возможности межоперационной подгонки и отбраковки микросхем и МСБ. Данное преимущество обеспечивает эффективность изменения параметров микросхем и МСБ, повышение их точности и стабильности при неизменной отработанной технологии. Специфичным процессом, при котором используют групповой принцип производства, является изготовление групп пленочных пассивных элементов и пленочных проводников на общей подложке.

Любая технология изготовления групп пленочных элементов включает в себя две обязательные операции: нанесение пленок из проводящего, изоляционного и резистивного материала на изоляционную подложку; формирование из этих пленок контуров элементов в плоскости подложки. Операции нанесения пленки и формирования рисунка можно осуществлять либо последовательно друг за другом, либо одновременно. Кроме того, контуры элемен-

тов можно формировать одновременно по всей подложке или же последовательной обработкой границ контуров.

В производстве ГИС, БГИС и МСБ практическая реализация технологических процессов может быть осуществлена с использованием одних и тех же физических, химических или физико-химических явлений. Например, термические явления успешно применяют для создания тонкопленочных и толстопленочных плат (испарение, вжигание в основных процессах); юстировки и коррекции номинальных значений элементов и стабилизации их необратимых изменений (испарение, рекристаллизация и окисление в дополнительных процессах).

Прежде чем перейти к изучению типовых процессов изготовления пленочных элементов МСБ, необходимо рассмотреть модель технологического процесса формирования пленок.

Укрупненная модель технологических процессов формирования пленок плат приведена на рис. 6, где основными технологическими вариантами являются вакуумная и толстопленочная технологии. При вакуумной технологии формирование пленок осуществляется как термическим напылением, так и ионным распылением. Ионное распыление имеет свои разновидности: катодное, реактивное, магнетронное, ионно-плазменное и высокочастотное распыление.

При двухэлектродной системе распыления (катодное, магнетронное и реактивное) нельзя применять металлическую маску для получения рисунка слоя пленочного элемента, поскольку она является экраном, искажающим электрическое поле между анодом и катодом. В результате этого искажения значительно уменьшается энергия ионов, бомбардирующих катод, и, следовательно, уменьшается скорость распыления, либо процесс прекращается вообще. В связи с этим катодное распыление чаще используют для нанесения сплошных тонкопленочных слоев, рисунок которых получают затем фотолитографией.

Для термического испарения материала используют токовый (резистивный), электронно-лучевой и индукционный методы

нагрева. Различие методов нагрева связано температурой испарения материалов. Наиболее часто применяют резистивный метод нагрева.

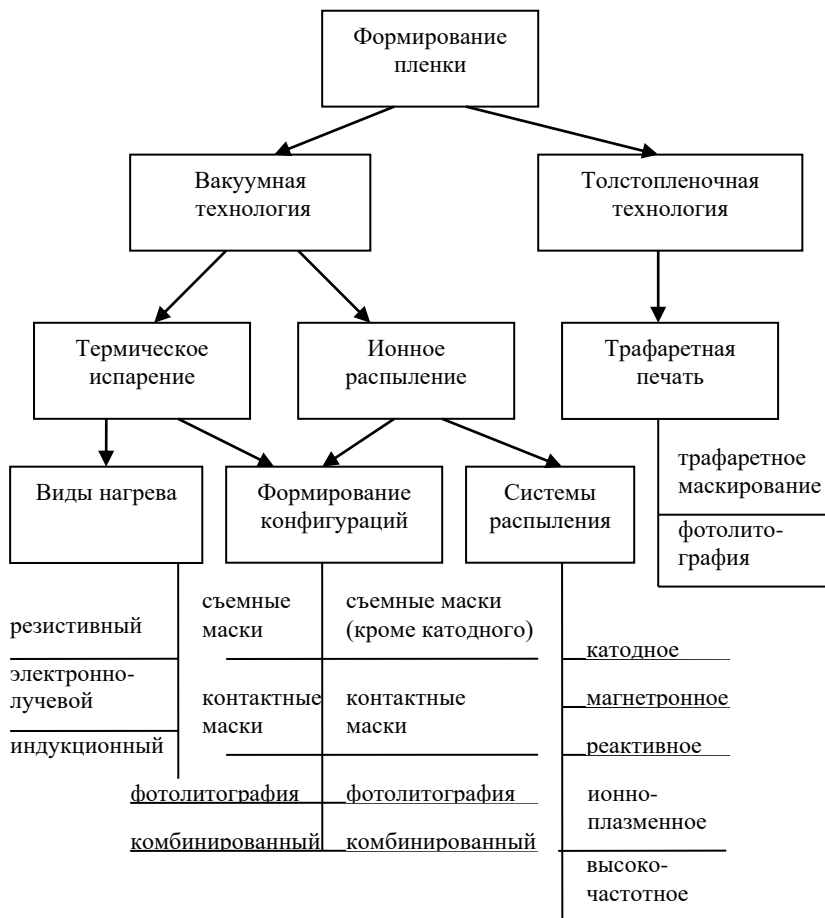


Рис. 6. Укрупненная модель формирования пленки различными технологическими вариантами

2. Технологические маршруты производства тонкопленочных плат микросборок

Технологический маршрут производства тонкопленочных плат МСБ – это совокупность технологических операций, направленных на подготовку материалов и подложки, осаждения материала на поверхность подложки, формирование конфигураций пленок и элементов, монтаж навесных компонентов, контроль и функциональная подгонка. Огромное значение имеют операции подготовки производства: изготовление комплекта масок и фотошаблонов; приобретение, проверка и подготовка компонентов и др.

В тонкопленочной технологии нанесение материалов на подложку осуществляют термическим испарением в вакууме и конденсацией их паров на поверхности подложки, ионным распылением мишеней из наносимых материалов, химическим осаждением пленок из газовой фазы. Для формирования конфигураций проводящего, резистивного и диэлектрического слоев наибольшее применение получили масочные и фотолитографический методы, а также их комбинации.

Важную роль при изготовлении тонкопленочных плат играют контрольно-проверочные мероприятия, осуществляемые в цехе (межоперационный контроль) и в отделе технического контроля (контроль готовых изделий).

2.1. Материалы для тонкопленочных плат МСБ

Подложка для тонкопленочных плат МСБ является конструктивным элементом, на поверхности которого формируются пленочные элементы и устанавливаются навесные компоненты. Материал и свойства подложек оказывают существенное влияние на параметры пленочных элементов.

Подложки должны обладать: шероховатостью поверхности по 13–14 классу чистоты обработки рабочей поверхности для тонкопленочных элементов; высокой теплопроводностью; инертностью химического состава к наносимым пленкам; устойчивостью к химическим реагентам; достаточной механической прочностью; высокой теплостойкостью; однородностью состава; согласованностью коэффициента теплового расширения с наносимыми пленками; высокими изоляционными свойствами; возможностью механической обработки (резки).

Шероховатость поверхности подложек является одним из наиболее критичных параметров тонкопленочных элементов, так как задает структуру и равномерность толщины пленки на подложке и воспроизводимость ее от подложки к подложке, что в конечном счете определяет разброс параметров элементов и процент выхода годных.

В случае тонкопленочных резисторов толщина пленок составляет меньше 1 мкм, поэтому вследствие микрошероховатости размером около сотен и более ангстрем удельное сопротивление резко колеблется по площади, что приводит к локальному нагреву и выходу из строя резистивного элемента.

В тонкопленочных конденсаторах из-за неравномерности толщины диэлектрического слоя происходит перераспределение электрического поля в диэлектрическом слое, то есть возникают места повышенной электрической напряженности, что является причиной пробоя диэлектрика и выхода конденсатора из строя.

Стабильности пленочных элементов способствует теплопроводность подложки. При низкой теплопроводности может возникнуть местный перегрев, вызывающий изменение характеристик или даже разрушение тонкой пленки. Высокая теплопроводность подложки обеспечивает выравнивание температурного градиента на поверхности, а также отвод тепла от резистора.

Значение коэффициентов теплопроводности подложек относительно теплопроводности меди, принимаемой за единицу, приведено в табл. 2.

Диэлектрическим свойствам подложки предъявляются высокие требования. Они должны иметь высокие значения объемного и поверхностного сопротивления, а также электрической прочности. Для уменьшения паразитных емкостных связей между отдельными элементами, расположенными на подложке, необходимо низкое значение диэлектрической проницаемости материала подложки.

Таблица 2. Значение коэффициентов теплопроводности материалов

Материал подложек	Относительный коэффициент теплопроводности
Стекло	
– Боросиликатное	0,002
– Аллюмосиликатное	0,003
– Кварцевое	0,003
Фотоситалл	0,005
Керамика на основе	
– TiO_2	0,01
– BeO	0,2
– Al_2O_3	0,05

Технологический процесс изготовления ГИС и плат МСБ состоит из ряда термических операций: напыления и термообработки резистивных, диэлектрических и проводящих пленок, защитных покрытий при температурах до 350 °С, присоединения выводов к контактными площадкам методами пайки, сварки. В связи с этим подложка должна обладать хорошими механическими свойствами и высокой температурой начала деформации.

Для уменьшения возникновения внутренних напряжений, приводящих к разрывам или отслаиванию пленки от подложки при

нагревании и охлаждении структуры подложка – пленка, коэффициенты термического расширения подложки и наносимого материала должны быть близки. Необходимо, чтобы механические свойства подложки были удобными для разрезания ее на отдельные платы при чистой поверхности излома.

Форма подложки представляет собой четырехугольную пластину длиной L , шириной B и толщиной D . Для длины и ширины подложек ГИС и плат МСБ, изготавливаемых по тонкопленочной технологии, установлены соответствующие размеры (табл. 3).

Таблица 3. Размеры подложек

L , мм	60	30	30	20	10	10	5	4
B , мм	48	48	24	16	16	12	6	4,5

Допустимое отклонение размеров для длины и ширины – 0,2–0,3 мм, Толщина подложек установлена 0,6; 1,0; 1,6 мм с отклонением 0,06 мм.

В качестве материала подложек МСБ используют стекло, ситаллы, керамику, металлы с изолирующей поверхностью. Применение нашли аморфные силикатные бесщелочные, боросиликатные, кварцевые стекла, ситаллы, фотоситаллы. Наибольшее применение получил ситалл.

Ситаллы относятся к стеклокристаллическим материалам. Они механически более прочны, чем аморфные силикатные стекла, имеют поверхность, как и у стекол по 13–14 классу чистоты обработки.

Разновидностью ситалла является фотоситалл – закристаллизованное светочувствительное стекло. Он состоит из 75 % оксида кремния, 11,5 % оксидалития, 10 % оксида алюминия и оксида калия, остальное – азотнокислое серебро и оксид цезия. Фотоситалл устойчив к кислотам, обладает высокой механической прочностью и термоустойчив. Удельное сопротивление его не превышает 10^{10} Ом·см. Рельеф рисунка фотошаблона проявляют ультрафиолетовым излучением на фотоситалле.

Основные электрофизические параметры ситалловых подложек приведены в табл. 4.

Таблица 4. Основные свойства ситаллов

Свойство	Марка				
	Ст-38-1	Ст-50-1	Ст-50-2	Ст-83	Ст-90
Плотность, г/см ²	2,9	2,8	2,8	2,9	2,9
Удельное сопротивление 10 ¹⁴ Ом·см ² /м	1	1	1	1	1
Электрическая прочность кВ/мм	40	70	80	90	105
Тепло- проводность, Вт/(м·К)	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3
Относительная диэлектрическая проницаемость	7,3	8,5	6,4	6,6	6,8
Тангенс угла диэл. потерь, tgδ·10 ⁻³	2	3	2	1	1
КТР·10 ⁻⁶ , 1/°С	3,8	5,2	5,7	8	9
Предел прочно- сти при изгибе σ _н ·10 ⁸ , Н/м ²	1,8	2,5	1,7	2,5	2,6

Материалы проводников и контактных площадок. Пленочные проводники в составе микросборок выполняют функции контактных площадок, коммутационных проводников, металлизированных переходов с одного уровня на другой, обкладок емкостных элементов, индуктивных элементов и микрополосковых линий передач, а также вспомогательных элементов (экранов, реперных знаков, топологических ключей). Тонкопленочные контактные площадки МСБ (рис. 7) могут быть выполнены в виде одно- двух- и трехслойных структур. Число слоев проводящих структур и выбор исходных материалов определяются их назначением, методами монтажа и конструкцией компонентов МСБ.

Многослойность контактных площадок обусловлена требованиями, которые предъявляются к проводящим элементам в зависимости от их функционального назначения. Основными и общими требованиями являются: адгезионная и антикоррозионная стойкость; способность к пайке или сварке; малое удельное сопротивление и хорошая электропроводность.

Трудно выполнить все эти требования, если использовать однослойные структуры (на основе одного материала). В качестве основного материала проводящего слоя применяют металлы с хорошей электропроводностью (Al, Cu, Au). Для повышения адгезии основных материалов к поверхности подложки применяют пленки хрома, титана, ванадия и никрома. Однако применение в производстве МСБ NiCr при методе фотолитографии требует использования сильных травителей.

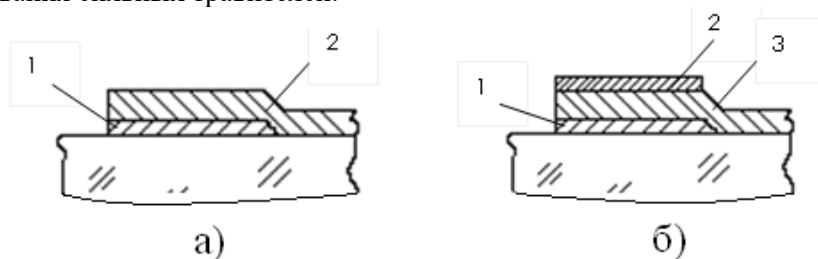


Рис. 7. Тонкопленочные контактные площадки: а – двухслойные, б – трехслойные; 1 – подслой (Cr), 2 – проводник (Au), 3 – проводник (Al)

Примерами двухслойных проводящих структур служат пары: Ti–Al, V–Al, Cr–Al, Cr–Au, Ti–Au и V–Au, которые нашли широкое применение в производстве плат МСБ. Данные структуры используют также для коммутационных проводников первого уровня и контактных площадок схем с многоуровневой разводкой.

Материалы для проводящих, адгезионных и защитных пленок представлены в табл. 5, а конструктивные разновидности структур контактных площадок – на рис. 7. В качестве антикоррозионных слоев используют пленки золота, никеля и низкотемпературные сплавы типа припоев различного состава. Защитная пленка должна не только предохранять слой проводящего материала от воздействия внешней среды, но и обеспечивать возможность пайки или сварки. Известно, что пленочная структура медь – золото при длительных высокотемпературных воздействиях в процессе монтажа и эксплуатации обладает повышенным коэффициентом взаимодиффузии. Это может привести к образованию интерметаллических соединений и деградации свойств контактной области.

Никель обладает высокой химической и температурной стойкостью, однако объемное удельное сопротивление его достаточно велико. Поэтому для уменьшения удельного поверхностного сопротивления однослойных пленочных структур необходимо увеличивать их толщину. Кроме того, для пленок никеля процессы пайки затруднены, так как требуются кислотные флюсы.

Алюминий имеет ряд преимуществ: обладает высокой электропроводностью, а разработанные технологические процессы позволяют получать пленки алюминия в широком диапазоне толщин; алюминий легко испаряется при вакуумном напылении из вольфрамовых и графитовых тиглей; благодаря высокой пластичности алюминий, нанесенный на подложку, устойчив к циклам нагрев – охлаждение и не теряет с ней сцепления, несмотря на существенное различие ТКЛР.

Основной недостаток пленки алюминия после снятия вакуума – окисление поверхности (Al_2O_3), что усложняет процесс пайки и сварки.

Таблица 5. Характеристики материалов проводящих, адгезионных и защитных пленок

Исходный материал	Толщина слоя, мкм	Удельное сопротивление, Ом/кв	Назначение
Хром	0,01	300...500	Адгезионный слой
Титан	0,01	1 000	то же
Ванадий	0,01	1 000	то же
Алюминий	0,4...2,0	0,2...0,02	Проводящий слой
Медь	0,8...12,0 10,0...50,0	0,05...0,005 0,05...0,005	То же
Золото	0,5...1,5 0,4...2,0	0,05...0,01 0,1...0,05	Защитно-монтажный слой
Никель	1,0...2,0	0,3...0,1	Защитный слой
Низкотемпературные сплавы	7,0...20,0	–	Защитно-монтажный слой

Двухслойные проводящие структуры контактных площадок на основе золота с адгезионным подслоем гарантируют высокое качество сварных и паяных соединений. При использовании в качестве проводящего слоя меди или алюминия контактную площадку выполняют трехслойной.

Такие контактные площадки, кроме адгезионного подслоя и проводящего слоя, содержат дополнительный защитно-монтажный слой. Пленки меди или алюминия характеризуются низким удельным сопротивлением, но не отличаются высокой коррозионной стойкостью. Защитное покрытие должно выполнять функции монтажного слоя, обеспечивающего возможность проведения процессов пайки или сварки. Трехслойные контактные структуры широко используются в тонкопленочной технологии. Однако применение

многослойных контактных площадок удлиняет технологический цикл изготовления плат МСБ.

Резистивные материалы. В микросборках широко применяют тонкопленочные резисторы, основными электрическими параметрами которых, определяющими выбор их конструкции и материалов, являются электрическое сопротивление, номинальная мощность рассеивания, временная и температурная стабильность. Тонкопленочные резисторы характеризуют также удельным поверхностным электрическим сопротивлением – сопротивлением квадрата тонкопленочного материала. Сопротивление пленочного резистора (рис. 8), имеющего длину L , ширину b , толщину d и удельное сопротивление ρ , определяют по формуле $R = \rho L/bd$. Сопротивление квадрата пленки $R_S = \rho/d$ не зависит от размера стороны квадрата, и его принято выражать в единицах Ом на квадрат (Ом/кв). При этом сопротивление тонкопленочного резистора по формуле $R = R_S L/b$.

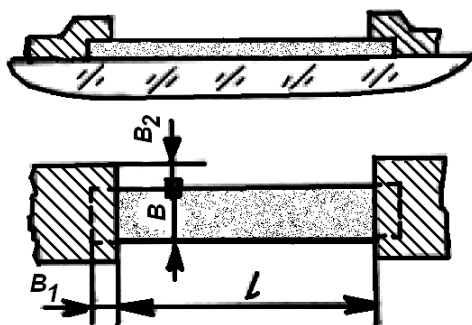


Рис. 8. Структура и топология тонкопленочного резистора

Так как минимальная ширина b резисторной пленки лимитируется возможностями фотолитографии, сопротивление тонкопленочного резистора определяется только поверхностным сопротивлением исходного резистивного материала R_S и длиной L резистивной полоски. Для уменьшения площади, занимаемой резистором, его часто выполняют в виде ломаной (зигзагообразной) полоски.

В микросборках тонкопленочные резисторы изготавливают из различных материалов: металлов, оксидов металлов и соединений металлов с диэлектриками. Следует отметить, что свойства тонких пленок из металлов и сплавов значительно отличаются от свойств этих материалов в монолитном виде. Так, тонкие пленки всех материалов и сплавов имеют более высокое удельное сопротивление, чем основной материал. На основе пленок титана и тантала, а также силицидов железа, никеля и хрома можно получать резисторы, обладающие значительным сопротивлением. Ренийевые и вольфрамовые резисторы могут работать при повышенных температурах.

Пленки нихрома $X_{20}H_{80}$, выполняемые термическим вакуумным испарением и конденсацией на подложках, нашли применение в микроэлектронике в качестве резисторов в микросхемах и микросборках. При этом получают сопротивление квадрата $R = 10 \dots 300$ Ом, ТКС – от $-3 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4}$. Допустимая мощность рассеяния $P_{\text{доп}} = 1$ Вт/см². Его достоинства (сравнительно высокое удельное сопротивление, стабильность, низкий ТКС) удалось реализовать в тонкопленочном варианте с помощью так называемого «взрывного» метода испарения, исключающего сегрегацию компонентов и обеспечивающего полную тождественность состава сплава в пленке и исходном материале. Нихром используют для получения только низкоомных резисторов ($R < 2 \dots 5$ кОм), так как его поверхностное сопротивление составляет $10 \dots 300$ Ом/кв при толщинах $10 \dots 300$ нм.

Резистивные пленки высокого удельного сопротивления могут быть получены при использовании в качестве исходных материалов композиции из порошкообразных смесей железа, кремния, никеля, хрома, оксидов титана, железа, алюминия, хрома, кадмия, кобальта, никеля с керамикой, стеклом. Изменяя состав проводящих компонентов (частиц металла) и их количество в общем объеме материала, можно изменить сопротивление пленочных резисторов.

В микроэлектронике находят также применение резистивные двух- и трехкомпонентные сплавы МЛТ. Один из таких сплавов МЛТ-3 (55 % Si, 30 % Cr, 15 % Fe) широко используется для изготовления тонкопленочных резисторов с удельным поверхностным

сопротивлением пленки 300 Ом/кв и ТКС равным 10^{-4} 1/°С. Наиболее распространены резистивные сплавы РС (табл. 6).

Таблица 6. Свойства и состав резистивных сплавов

Свойство	РС-3710	РС-1004	РС-1747	РС-3001	РС-4206	РС-4800
Плотность, г/см ³	7	3,5	5	4	4,6	4,7
Удельное сопротивление, $R_s \cdot 10^4$ Ом/кв	0,7	2	0,05	0,3	0,5	0,01
Температура плавления, °С	1 250	1 380	1 420	1 350	1 400	1 550
Мощность рассеивания, Вт/см ²	4,8	5	3,5	5	5,5	5
Толщина пленки, мкм	0,3	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15
ТКС 10^{-4} 1/°С	2	1,5	5	3	2	2
Состав, %:						
Хром	37	–	17	30	42	48
Кремний	53	86	42	69	52	52
Железо	–	4	14	1	–	–
Вольфрам	–	–	27	–	–	–
Никель	10	10	–	–	6	–

Наибольшее распространение получили три из них: РС 3001 (30 % Cr, 1 % Fe, остальное Si), РС 3710 (37 % Cr, 10 % Ni, остальное Si) и сплав РС-1747 (17 % Cr, 14 % Fe, остальное Si), имеющие поверхностное сопротивление $R_s = 50 \dots 1\,000$ Ом/кв и ТКС $< 1 \cdot 10^{-4}$

1/град. Установлено, что большую роль в пленочных силицидах играет кислород, который интенсивно поглощается кремнием из остаточной атмосферы вакуумной камеры при напылении. Захваченный пленкой кислород в виде SiO_2 выделяется по границам зерен, образуя тонкую диэлектрическую прослойку, что в сильной мере сказывается на удельном сопротивлении и ТКС пленки.

Хромосилицидные сплавы выпускаются в виде порошков с равнозерненными частицами диаметром 40...70 мкм, удобных для «взрывного» испарения. Если резистивные пленки получают ионно-плазменным методом, исходные сплавы необходимо изготавливать в виде мишеней-дисков диаметром 150...200 мм.

Для изготовления высокоомных ТПР используют ряд резистивных сплавов РС-1004, РС-3710 и др.

Пленки на основе РС получают методом «взрывного» испарения в вакууме, а также методами ионно-плазменного распыления. Для РС-1004 материалом контактов служит алюминий, а для РС-3710 – хром – никель, хром – золото.

В резисторах на основе РС-1004 с $R_s = 40\text{--}50$ Ом/кв при естественном хранении за 1 000 ч сопротивление изменяется на $\pm 1,0$ %, под воздействием нагрузки 5 Вт/см² за 1 000 ч – на ± 2 %, после 15 термоциклов ($-60\text{...}+125$ °С) – на $0,5\pm 0,3$ %. При температуре 150 °С ТКС составляет $(1,5\text{--}2,5) \cdot 10^{-3}$ 1/град.

Основным недостатком, ограничивающим применение резисторов на основе РС-1004, является высокое абсолютное значение ТКС. Изменение скорости испарения в широких пределах, варьирование в процессе напыления температуры подложки от 150 °С до 450 °С, отжиг образцов на воздухе при температуре 150 °С не позволяют уменьшить ТКС. Несмотря на это высокоомные резисторы с $R_s = 50$ Ом/кв применяются.

На основе сплава РС-3710 возможно создание «взрывным» испарением стабильных ТПР с удельным сопротивлением 3 Ом/кв. Однако для этого необходимо проводить термообработку при температуре 350 °С в течение 4 ч. При этом ТКС близок к нулю.

Стабильность таких резисторов при температуре 75 °С в течении 500 ч не ниже 0,15 %. При использовании ионно-плазменного распыления сплава РС-3710 резисторы с удельным сопротивлением в 300 Ом/кв обладают хорошей временной стабильностью, которая с увеличением удельного сопротивления до 5 000 Ом/кв ухудшается.

В микросборках широкое применение нашли керметы – пленочные материалы на основе микрокомпозиции, состоящей чаще всего из хрома и монооксида кремния в соотношении 10:1. Иногда используют другие соотношения (К-20С, К-30С, К-50С).

Наиболее часто применяют керметы двухкомпонентного состава. Получение на их основе пленок с данным составом требует контроля скорости испарения каждого компонента, что возможно при испарении из двух независимых источников. Однако такой способ является достаточно сложным. Поэтому для получения пленок данного состава используют «взрывное» испарение порошкообразных смесей или катодное распыление мишени из кермета.

Скорость испарения имеет важное значение для металлокерамических пленок. Уменьшение скорости испарения при хорошем вакууме повышает значение удельного сопротивления и ведет к более положительному ТКС.

Снижение скорости испарения при недостаточном вакууме может вызвать окисление пленки, изменение ее состава и снижение стабильности.

Параметры керметных пленочных резисторов определяет температура подложки. С ее увеличением происходит спекание компонентов пленки и их кристаллизация, а удельное сопротивление уменьшается.

В металлокерамических пленках с диэлектриком, обладающим малой подвижностью, процессы рекристаллизации менее выражены, чем в случае диэлектрика с большой подвижностью.

Температура подложки в процессе напыления является одним из факторов, определяющих ТКС резисторов: с ее увеличением ТКС уменьшается. Температурная обработка керметных пленок оказывает значительное влияние на параметры ТПР.

Увеличение температуры и длительности стабилизации приводит к более положительному значению ТКС, причем в отличие от времени стабилизации металлических резисторов время стабилизации керметных пленок составляет не менее 2 ч. Стабилизация производится как в вакууме, так и в атмосфере при защитном диэлектрическом слое толщиной 10 000 ангстрем, например материалом SiO.

Для системы Cr-SiO повышение температуры стабилизации до 350 °С улучшает характеристики резисторов. Однако дальнейшее повышение температуры стабилизации может вызвать ухудшение стабильности резисторов, что связано с неустойчивостью SiO и образованием соединения Cr₃SiO. Для системы Cr-SiO эта критическая температура составляет 450–550 °С.

Диэлектрические материалы МСБ. Диэлектрические материалы применяют в составе емкостных элементов (рис. 9), а также в качестве защитных покрытий и межуровневой изоляции коммутационных схем МСБ. Для этих целей используют: окислы металлов (Al₂O₃, Ta₂O₅, Hf₂O₅ и другие); окислы и нитриды полупроводников (SiO₂, GeO, Si₃N₄, SiO и другие); стекла различного состава, например, боросиликатное и алюмосиликатное; различные органические соединения, например фоторезисты и полиимиды. Диэлектрические материалы, которые применяют при создании МСБ, и их основные параметры приведены, в табл. 7.

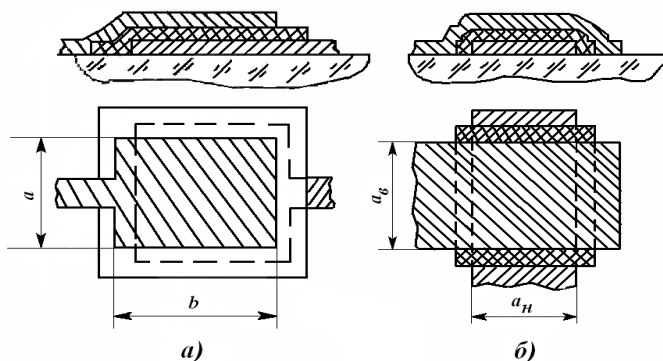


Рис. 9. Пленочные конденсаторы: а – большой емкости; б – малой емкости

Диэлектрические пленки на основе окислов металлов получают различными способами: термическим испарением в вакууме с помощью электронного луча; высокочастотным ионно-плазменным распылением; химическим осаждением из газовой фазы и электрохимическим анодированием. Метод электрохимического анодирования, как наиболее простой и гибкий, с точки зрения получения пленок с заданными свойствами предназначен для межуровневой изоляции в коммутационных схемах и формирования диэлектрика емкостных элементов. В качестве диэлектриков для тонкопленочных конденсаторов применяют также оксиды тантала Ta_2O_5 и титана TiO_2 . При изготовлении тонкопленочного конденсатора с диэлектриком из оксида тантала толщиной менее 1 мкм тантал служит одним из его обкладок. Диэлектрическая пленка оксида тантала образуется в результате анодного окисления слоя тантала. Для получения второй обкладки на образовавшийся слой оксида тантала наносят слой золота, алюминия или снова тантала. Пленки оксида тантала позволяют получать удельную емкость конденсаторов порядка 10^5 пФ/см². Высокая удельная емкость танталовых конденсаторов обусловлена не столько повышенной диэлектрической проницаемостью оксида тантала ($\epsilon = 20$), сколько возможностью нанесения тонких пленок диэлектрика.

Наиболее распространенными диэлектрическими окисными пленками являются пленки из монооксида кремния. Пленки SiO механически прочные, твердые, имеют высокое значение пробивного напряжения для однородных аморфных пленок ($E_{пр} = 10^3$ В/мкм).

Состав и свойства пленок монооксида кремния, полученных осаждением в вакууме, существенно зависят от условий осаждения: от температуры испарения, скорости осаждения, давления в вакуумной камере. Пленки полученные при температуре испарения ($T_{и}$) ниже 1 250 °С (малые скорости осаждения), имеют значительные внутренние растягивающие напряжения, что в результате приводит к их отслаиванию от подложки. Это объясняется тем, что пленки SiO на воздухе легко окисляются до SiO₂, в результате увеличивается их плотность ($Y_{SiO} = 2,15$ г/см³; $Y_{SiO_2} = 2,20$ г/см³) и растягивающие напряжения переходят в сжимающие.

Таблица 7. Диэлектрические материалы, применяемые при создании микросборок

Исходный материал	Толщина, мкм	Электрические параметры			
		ϵ	Удельная емкость, пФ/см ²	ТКЕ $\times 10^4 / ^\circ\text{C}$	Tg $\delta \times 10^4$
Боросиликатное стекло	0,6...2,0	4	(5... ...15) 10^3	0,3...2,0	10..15
Алюмосиликатное стекло	0,4...0,8	5	(15... ...30) 10^3	0,5...2,0	20...3 0
Оксид алюминия	0,15...0,2 70...100	10	(30... ...50) 10^3	2	50...8 0
		8	(1... ...2) 10^3	6	200
Пятиокись тантала	0,15...0,2	22	(50... ...100) 10^3	4	100
Моноксид кремния	0,15...0,2	5	12×10^3	3	5
Двуокись титана	0,15...0,2	80	25×10^3	3	3

Пленки, осажденные при $T_{\text{и}} = 1\ 250...1\ 400\ ^\circ\text{C}$ (средние скорости осаждения), получают более плотными и окисляются только с поверхности, так как образовавшаяся защитная пленка SiO_2 препятствует дальнейшему окислению пленки и поэтому в пленке сохраняются растягивающие напряжения.

Пленки, полученные при $T > 1\ 400\ ^\circ\text{C}$ (высокие скорости осаждения), имеют большие внутренние напряжения, которые приводят к появлению в них многочисленных трещин. Для изготовления

пленок SiO с удовлетворительными параметрами осаждение следует проводить при $T_{\text{и}} = 1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре подложки $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует скорости осаждения $0,0012\text{--}0,0015\text{ мкм/с}$. Пленки SiO, полученные в этих условиях механически прочные, твердые, имеют в интервале частот от 1 кГц до 1 МГц диэлектрическую проницаемость $\epsilon = 5\text{...}7$, а тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,01\text{...}0,02$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Близким по параметрам к пленкам монооксида кремния являются пленки монооксида германия, которые получают методом термического испарения в вакууме. Сравнение свойств SiO и GeO, полученных методом термического испарения в вакууме, показывает:

- 1) электрические свойства пленок GeO в большей степени зависят от частоты, чем SiO;
- 2) пленки GeO значительно ухудшают свои свойства под действием влаги;
- 3) GeO имеет более низкую температуру испарения ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$), чем SiO ($1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), что снижает загрязнение пленки посторонними примесями, например материалом испарителя.

Пленки Si_3N_4 имеют достаточно большое электросопротивление ($10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{м}$), высокую электрическую прочность 10^{-4} В/мкм . Электрические свойства стабильны даже при высоких температурах, значение диэлектрической постоянной в $2\text{...}2,5$ раза выше по сравнению с окисными, коэффициент теплопроводности отличается примерно на порядок. Существенным является то, что пленки слабо подвергаются химическим воздействиям растворов, составленных на основе плавиковой кислоты. Пленки Si_3N_4 изготавливаются двумя основными способами: реактивным распылением и пиролизом.

Пленки окиси алюминия по сравнению с пленками окиси кремния обладают более высокими значениями диэлектрической проницаемости и лучшими маскирующими свойствами (ограничивают диффузию воды, кислорода, водорода и ряда других веществ).

Пленки Al_2O_3 можно получать различными методами: электронно-лучевым испарением, анодированием, анодированием в плазме, высокочастотным и реактивным катодным распылениями,

термическим окислением, газоплазменным распылением, пиролизом. Диэлектрическая проницаемость пленки $\varepsilon = 4 \dots 7$, а для объемного материала $\varepsilon = 8,5$. Пробивная напряженность для пленок и объемного материала одинакова ($E_{пр} = 300$ В/мкм). Удельное объемное сопротивление для пленок несколько выше. Тангенс угла диэлектрических потерь пленок на порядок выше, что можно объяснить присутствием связанного кислорода в пленке и его поляризацией. При нагревании пленок на воздухе, благодаря десорбции, $\text{tg}\delta$ уменьшается.

Боросиликатное стекло применяют при проектировании как низкочастотных, так и высокочастотных схем, а также некоторых прецизионных схем на RC-структурах, в том числе с распределенными параметрами. Алюмосиликатное стекло используют преимущественно при формировании многослойных емкостных структур с целью повышения удельной емкости на единицу площади.

Последняя группа диэлектрических материалов – это фоторезисты и полиимиды, которые выполняют обычно функции защитных слоев низкочастотных и прецизионных схем, а также межуровневой изоляции коммутационных схем с многоуровневой разводкой. Для повышения качества емкостных элементов высокочастотных схем и межуровневой изоляции применяют комбинированные диэлектрики, состоящие из двух слоев пленок различных материалов с отличными свойствами, например по диэлектрической проницаемости или плотности.

2.2. Технологические способы формирования конфигураций пленочных элементов

Рисунок тонкопленочной микросхемы и платы МСБ складывается из рисунков слоев, совмещенных между собой с требуемой точностью. В связи с этим очевидно, что электрические параметры платы зависят не только от электрофизических свойств пленок, но и

от точности воспроизведения как рисунков отдельных слоев, так и рисунка платы в целом в процессе изготовления, то есть от метода получения рисунка.

В настоящее время используют в основном три метода получения рисунков слоев тонкопленочных элементов.

Первый, наиболее распространенный в серийном производстве, основан на осаждении пленок через съемные маски, представляющие собой тонкие металлические пластинки со сквозными окнами определенного рисунка. Меняя маски перед нанесением каждого слоя, получают требуемый рисунок тонкопленочной платы.

Второй метод – контактное маскирование. Контактная маска обычно изготавливается непосредственно на поверхности подложки (или ранее нанесенной пленки) в виде защитной пленки заданной конфигурации. Она используется однократно и обеспечивает высокую точность (3–5 мкм).

Третий метод – метод фотолитографии сплошных тонкопленочных слоев – основан на фотопереносе изображения со специального фотошаблона на светочувствительный слой (фоторезист), нанесенный на сплошную пленку. При последующем проявлении изображения отдельные участки пленки оказываются незащищенными слоем фоторезиста и могут быть легко удалены с поверхности подложки путем химического травления. Этот вариант основан на использовании контактной маски.

Таким образом, в производстве тонкопленочных микросхем и плат МСБ применяют два типа масок: съемные (свободные) и контактные, которые, в свою очередь, изготавливают путем фотопереноса изображения с фотошаблонов. Поэтому прежде всего рассмотрим технологию изготовления фотошаблонов.

Изготовление фотошаблонов. Фотошаблон представляет собой фотокопию рисунка слоя тонкопленочных элементов, выполненную в натуральном масштабе с высокой точностью. Характерной особенностью фотошаблона является то, что рисунок слоя

элементов на нем повторяется много раз, то есть мультиплицируется. Такие фотошаблоны затем используют для получения многоместных фотошаблонов и масок, позволяющих изготавливать по нескольку микросхем на одной подложке одновременно. В табл. 8 приведены варианты технологических процессов изготовления фотошаблонов.

Для малой и средней степени интеграции изготовление эталонного фотошаблона начинается с вычерчивания фотооригинала, то есть первичного изображения рисунка слоя микросхемы или платы в увеличенном масштабе (рис. 10).

К первичному фотооригиналу предъявляются требования точности и стабильности размеров изображения, высокой контрастности и бездефектности. Заготовкой фотооригинала является лист полированного стекла, покрытого черной эмалью.

Масштаб изображения фотооригинала зависит от требуемой точности способа изготовления фотооригинала. Если известная допустимая погрешность негатива Δ_n и достижимая точность фотооригинала Δ_0 , то масштаб изображения M на фотошаблоне определяется как

$$M = \frac{\Delta_0}{\Delta_n}.$$

Например, если известно, что $\Delta_n = 0,005$ мм, а $\Delta_0 = 0,05$ мм, то изображение на фотооригинале следует выполнить в масштабе $M = 0,05 / 0,005 = 10$.

Элементы рисунка фотооригинала получают на координатографе путем резания резцом (скрайбирования) участков пленки эмали, подлежащих удалению. Координатограф (ручной или с числовым программным управлением) представляет собой жесткий массивный стол, снабженный подвижной кареткой с резцом. Каретка с помощью ручного или автоматического привода может перемещаться по координатам x и y , при этом резец наносит риски на пленке. Резец поворачивается так, что его передняя грань всегда направлена в сторону движения.

Таблица 8. Варианты техпроцесса производства фотошаблонов и формирование изображений на подложках в зависимости от степени интеграции ИС и плат МСБ

Степень интеграции	Основные этапы и оборудование, масштаб изображений на фотошаблонах	Способ воспроизведения изображений на пластинах
Малая и средняя	<pre> graph TD A[Управляющая программа] --> B[Кордина-тограф] B --> C[Редукционная фотокамера] C --> D[Фото-повторитель] D --> E[Установка контактной печати] E --> F[Контактная печать] </pre>	Контактная печать
Средняя и большая	<pre> graph TD A[Управляющая программа] --> B[Генератор изображений] B --> C[Фото-повторитель] C --> D[Установка контактной печати] D --> E[Контактная печать] </pre>	Контактная печать
Большая	<pre> graph TD A[Управляющая программа] --> B[Генератор изображений] B --> C[Проекционная печать с мультиплицированием] </pre>	Проекционная печать с мультиплицированием
Сверх-Большая	<pre> graph TD A[Управляющая программа] --> B[Генерирование изображений с мультиплицированием] </pre> <p style="text-align: right;">(Бесшаблонный метод изготовления ИМС)</p>	Генерирование изображений с мультиплицированием

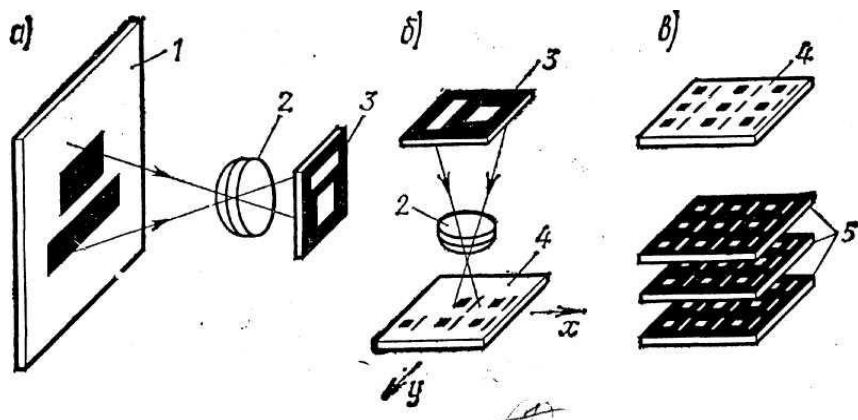


Рис. 10. Первичный отъем фотооригинала с уменьшением (а), вторичный отъем промежуточного фотооригинала с одновременным мультиплицированием (б); контактная печать с эталонного фотошаблона (в):
 1 – фотооригинал ($M = 300 \div 500$); 2 – объектив; 3 – промежуточный фотооригинал ($M = 10 \div 30$); 4 – эталонный групповой фотошаблон ($M = 1$);
 5 – рабочие групповые фотошаблоны

В производстве находят применение ручные ЭМ-701 и ЭМ-707 с рабочим полем до 800×800 мм и автоматизированные ЭМ-703 и ЭМ-706 с рабочим полем $1\,200 \times 1\,200$ мм координатографы (скорость перемещения резца 5,5 и 1 м/мин соответственно). Точность позиционирования резца для указанных моделей – ± 50 мкм.

Первичный отъем с уменьшением (редуцирование) производят в редуциционной фотокамере. Редуциционные фотокамеры ЭМ-503 и ЭМ-513 позволяют производить отъем с фотооригиналов, имеющих максимальные размеры 750×750 и $1\,200 \times 1\,200$ мм соответственно на фотопластины с размерами 60×90 или 90×120 мм. Уменьшение для фотокамеры ЭМ-503 – 1:30, 1:20 и 1:10; для ЭМ-513 – 1:50, 1:40, 1:30.

Отъем производят на эмульсионные фотопластины высокого разрешения, например СРБШ, имеющие разрешающую способность 2 000 линий/мм, светочувствительность 5 ед. ГОСТа и оптическую плотность (после проявления) непрозрачных участков более 3 ед. ГОСТа.

В результате последующей фотохимической обработки (проявления и фиксации изображения) получают промежуточный фотооригинал на эмульсионной основе. Для сохранения качества целесообразно снять с него копии на пластины с прочным покрытием (например, хромом).

Групповой фотошаблон создают путем мультиплицирования изображения рисунка т. е. пошагового впечатывания уменьшенного до натурального размера изображения промежуточного оригинала на фотопластину. Процесс выполняется на специальных оптико-механических установках – фотоповторителях. Фотоповторители (табл. 9) должны обеспечивать высокую степень совмещаемости комплекта фотошаблонов.

Таблица 9. Основные характеристики фотоповторителей

Характеристики	ЭМ-515А	ЭМ-522А	ЗМ-525	ЭМ-552
Максимальный рабочий ход по двум осям координат, мм	80 × 80	80 × 80	80 × 80	140 × 140
Точность позиционирования, мкм	±2,5	±0,2	±0,25	±0,5
Число позиций	6	1	6	1
Масштаб уменьшения	10	20, 10, 4	10	10, 4
Диаметр рабочего поля объектива, мм	4,5	3,5, 8,5, 21	4,5	8,5, 21
Разрешающая способность объектива, линий/мм	1 100	600, 1 000, 1 360	750–850	900–1 200

Мультиплицирование изображений можно выполнять не только на эмульсионных фотопластинах, но и на пластинах, покрытых фоторезистом с подслоем хрома. Это позволяет сократить число этапов производства фотошаблонов за счет исключения этапа экспонирования эмульсионного эталонного фотошаблона, который имеет низкую стойкость к контактной печати. Поскольку чувствительность фоторезистов ниже, чем фотоэмульсий, для достижения приемлемых выдержек при мультиплицировании (десятыи доли секунды) необходимы мощные источники света. Из-за повышения требований к качеству нанесенных слоев целесообразно применять пластины специализированного производства ПФХ-03-0,5 (с фоторезистом и подслоем хрома), имеющие плотность проколов в пределах 0,2–0,8 см². Основой этих пластин является оптическое стекло К-8.

Рабочие фотошаблоны, т. е. фотошаблоны, используемые непосредственно для экспонирования фотослоя на полупроводниковых пластинах и диэлектрических подложках, представляют собой копии с эмульсионных или хромированных эталонов, полученные методом контактной печати. Для хромированных фотошаблонов могут быть использованы пластины ПФХ-03-0,5, а для полупрозрачных (транспарентных) – пластины ПМС-В или ПМС-ФП-1, покрытые окисью железа. Пластины ПМС-ФП-1 имеют также покрытие из фоторезиста (ФП-617).

В целом изготовление рабочих копий с эталонных фотошаблонов представляет собой процесс контактной фотолитографии. Качество фотошаблона, т. е. пригодность его для дальнейшего использования, определяется количеством (плотностью) дефектов, их размерами и местом расположения в поле модуля. Контроль групповых фотошаблонов – эталонных и рабочих – необходим не только непосредственно после изготовления, но и периодически в процессе эксплуатации.

Во втором варианте (см. табл. 8) процесс изготовления фотошаблонов начинается изготовлением оригинала с относительно небольшим масштабом увеличения (10:1). Полученный оригинал непосредственно может быть использован для изготовления групп

пового эталонного фотошаблона с помощью фотоповторителя. Такой сокращенный технологический цикл возможен при условии, если размеры элементов топологического рисунка оригинала и их взаимное расположение обеспечиваются с погрешностью, не превышающей $\pm(1 \div 1,5)$ мкм. Эти возможности реализованы в прецизионных оптико-механических установках, получивших название генераторов изображения (табл. 10).

Таблица 10. Характеристики генератора изображений ЭМ-559Б

Максимальный рабочий ход стола по каждой из координат, мм	150
Точность позиционирования координатного стола, мкм	$\pm 0,5$
Погрешность размера, мкм, наборного элемента при размерах элемента, мкм: до 50 от 50 до 100 от 100 до 3 000	± 1 $\pm 1,4$ $\pm 1,8$
Погрешность поворота наборной диафрагмы на угол 0–90°	± 3
Время экспонирования, сек	0,05–10
Дискретность времени экспонирования, сек	0,01
Расход обеспыленного сжатого воздуха, м ³ /ч	3
Напряжение питания, В	220/380 (50 Гц)
Потребляемая мощность, кВт	2,5
Занимаемая площадь, м ²	20

В основе работы генератора изображения лежит принцип фотонабора. Топологическая структура рисунка расчленяется на элементарные прямоугольники с различным отношением сторон и определенной ориентацией по углу. По заданной программе очередной элемент формируется подвижными шторками диафрагмы и разворачивается на необходимый угол, а двухкоординатный стол, несущий светочувствительную пластину, отрабатывает заданные координаты. После остановки стола производится экспонирование с заранее установленной выдержкой.

Управление генератором ЭМ-559Б ведется с клавиатуры электрической печатающей машинки «Консул». Управляющая программа предусматривает диалог с оператором.

Третий вариант предполагает изготовление оригинала на генераторе изображений и последующее мультиплицирование изображения оригинала (с уменьшением) непосредственно на полупроводниковых пластинах и подложках, покрытых фоторезистом. Фотоповторитель, таким образом, используется в основном производстве.

По сравнению с предыдущим вариантом время, затрачиваемое на операцию совмещения помодульного экспонирования полупроводниковых пластин, здесь с изготовлением, контролем и отбраковкой групповых шаблонов, снижается дефектность модулей и повышается выход годных ИМС. Этот вариант предпочтителен при небольших объемах выпуска и значительных размерах кристаллов, т. е. в условиях производства БИС.

Четвертый вариант, основанный на генерировании мультиплицированного изображения непосредственно в слое чувствительного резиста на поверхности пластины (подложки), требует разработки систем программированной развертки острофокусированного луча (светового, электронного). Процесс может быть эффективным при наличии высокочувствительных резистов, а также высокопроизводительных и точных средств совмещения.

Полученный в результате пересъемки и мультипликации негатив иногда ретушируют, исправляя дефекты изображения. После

этого негатив контролируют соответствие техническим требованиям по контрастности и точности изображения, а также на отсутствие размытостей и проколов.

Изготовление масок. Получение заданных конфигураций, размеров и взаимного расположения пленочных элементов осуществляется в несколько этапов в соответствии с количеством слоев микросхемы и топологией каждого слоя, а также точным совмещением изображений слоев друг с другом. Для формирования топологии слоев используют контактную или съемную маску.

Контактная маска. Она изготавливается непосредственно на поверхности подложки в виде рельефного слоя с соответствующими окнами и удерживается силами адгезионного сцепления. Контактная маска используется однократно и обеспечивает точность 3–5 мкм.

К материалу контактной маски предъявляются следующие требования: отсутствие химического взаимодействия с материалами подложки и осаждаемой пленки; отсутствие примесей, ухудшающих электрофизические свойства подложки и осаждаемой пленки; легкость растворения в органических растворителях или травителях, которые не реагируют с материалом осаждаемой пленки и подложки; сохранение своих свойств при нагреве в вакууме до температуры 200–250°С.

Существуют две разновидности метода контактной маски: на основе фоторезиста и металла, легко растворимого в травителях (например, алюминия или меди). В обоих вариантах в качестве основного материала для формирования рельефного слоя с окнами применяют фоторезисты. Существуют два класса фоторезистов: негативные (ФН) и позитивные (ФП). Механизмы формирования изображения у позитивных и негативных фоторезистов существенно отличаются: при воздействии светового потока пленки позитивных фоторезистов разлагаются и при обработке в травителе растворяются и удаляются. В пленках негативных фоторезистов при облучении вследствие реакции значительно уменьшается растворимость фоторезистивной пленки.

При сравнении позитивные фоторезисты обладают несколько большей разрешающей способностью, однако уступают негативным по адгезии к подложке. На рис. 11, а представлены основные источники размытости кромок фоторезиста. На подложку или защищаемую пленку 3 нанесен фоторезист 2, к которому плотно прижат фотошаблон 1 (правая часть его не пропускает ультрафиолетовый свет). Свет в затемненную область фоторезиста может попасть за счет дифракции 4, диффузионного рассеивания в слое 5 и за счет отражения от подложки 6. Негативные и позитивные фоторезисты будут по-разному реагировать на эти явления. Верхняя часть слоя негативных фоторезистов, частично засвеченная вследствие дифракции и рассеивания света, не окажет существенного влияния, так как при проявлении она в основном будет вымыта (рис. 11, б). Наоборот, нижняя часть слоя фоторезиста, засвеченная в результате отражения от подложки и рассеивания, сохранится, так как она достаточно прочно удерживается силами адгезии. В результате у подложки толщина слоя окажется убывающей (рис. 11, б). В позитивных фоторезистах верхний слой в результате дифракции и рассеивания будет частично засвечен и вымыт при проявлении, т. е. будет округленной верхняя кромка (рис. 11, в). Отражение и рассеивание света также вызовут частичное разрушение нижнего слоя фоторезиста, однако вследствие адгезии проявитель лишь незначительно вымоет эту область.

Фоторезистную контактную маску изготавливают в следующей последовательности:

– Подготовка поверхности подложки путем обезжиривания в парах органического растворителя.

– Нанесение фоторезиста на подложку; этот процесс (основная операция) производится погружением в раствор, распылением с помощью пульверизатора или центрифугированием. В процессе нанесения фотослоя на поверхность подложки необходимо обеспечить равномерность по толщине и однородность по структуре (отсутствие пор, вкрапление инородных частиц и др.).

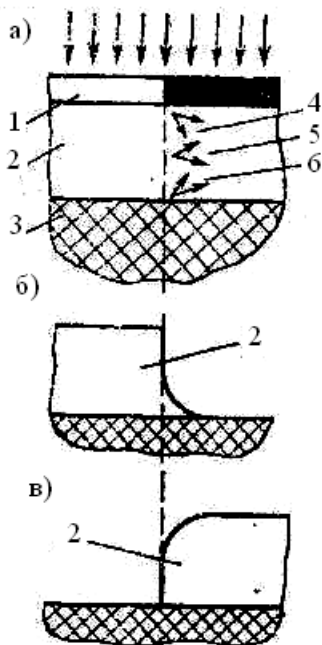


Рис. 11. Формирование кромок фоторезистной маски

– Сушка для полного удаления органического растворителя фоторезиста при температуре 80–120 °С в течение 15–20 мин.

– Совмещение фотошаблона с подложкой и экспонирование ультрафиолетовыми лучами света; экспонирование производится через фотошаблон (ФШ) контактным или проекционным способами.

– Проявление и отмывки в растворителях; для фоторезиста ФП-383 используют тринатрий фосфат $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (20 г на 1 л деионизованной воды).

– Задубливание для повышения кислотоустойчивости фотомаски при температуре 210–240 °С в течение 0,5–1 ч.

Технологический маршрут формирования фоторезистной контактной маски приведен на рис. 12, где на поверхность подложки нанесен слой фоторезиста. Экспонирование фотослоя проводят

через фотошаблон, и в результате фотообработки на поверхности подложки остается фоторезистная контактная маска.

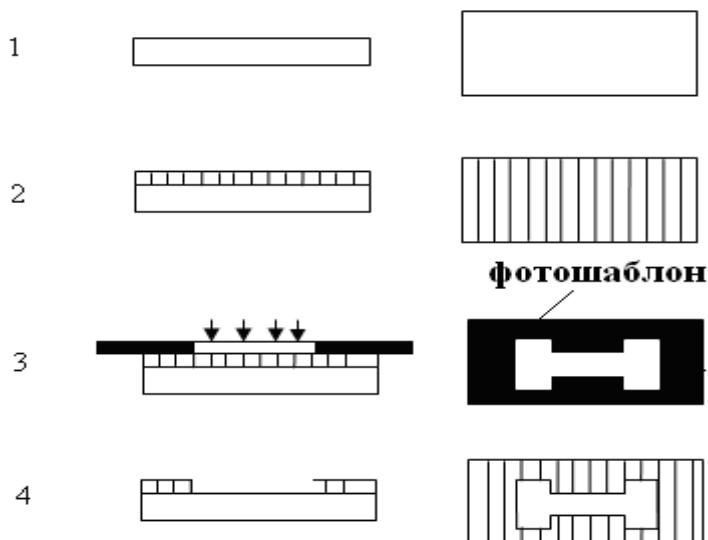


Рис. 12. Технологический маршрут получения фоторезистной контактной маски:
 1 – подложка; 2 – нанесение фоторезиста; 3 – экспонирование;
 4 – фотообработка фоторезистного слоя

Разновидностью рассмотренной контактной маски является метод, когда роль фоторезиста выполняет пленка из легкорастворимого металла (алюминия или меди). Такую контактную маску получают в следующей последовательности (рис. 13): на очищенную подложку методом вакуумного напыления наносят тонкий слой 0,3–0,5 мкм материала, хорошо поддающегося травлению (медь, алюминий), а на этот слой – фоторезист, после чего проводят процесс фотолитографии. В результате на поверхности подложки остается пленочный слой – маска. Такую контактную маску применяют при высоких температурах обработки, а также когда материал тонкопленочной схемы трудно поддается травлению (например, при изготовлении резисторов из ниобия, тантала).

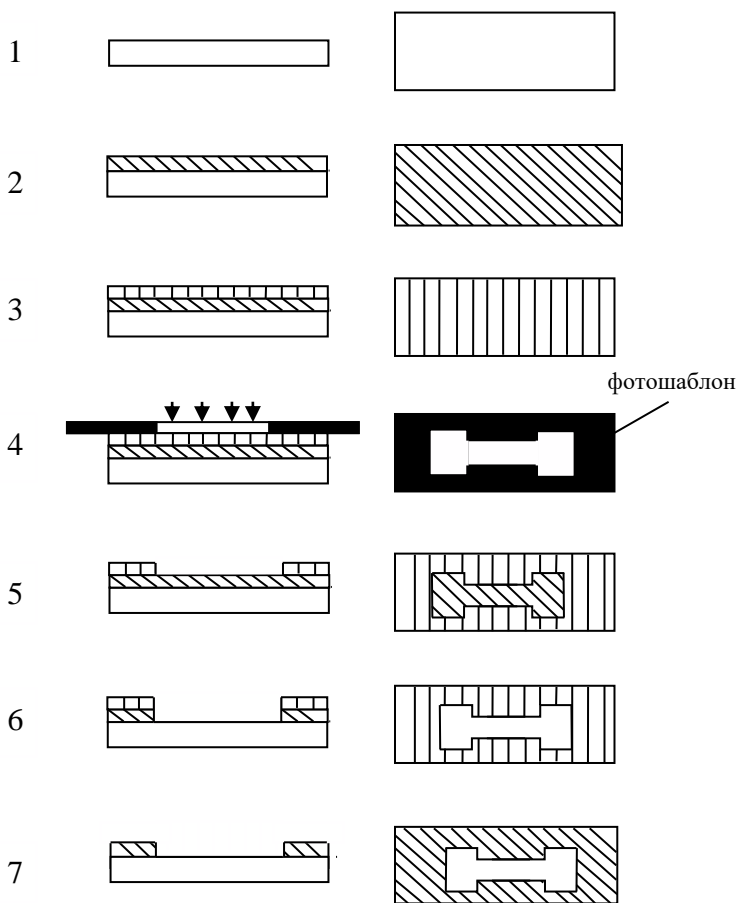


Рис. 13. Технологический маршрут получения металлической контактной маски:

- 1 – подложка; 2 – напыление материала контактной маски; 3 – нанесение фоторезиста; 4 – экспонирование; 5 – фотообработка фоторезистного слоя; 6 – травление материала через фоторезистную маску; 7 – снятие фоторезиста

Свободные маски. Свободная (съемная) маска представляет собой тонкую пластину с окнами, очертания и расположения которых соответствуют требуемой конфигурации напыляемой пленки. Ее укрепляют механически, обеспечивая плотный контакт с подложкой. Осаждение испаряемых веществ на подложке происходит только на

незащищенных участках. Свободные маски используются многократно и обеспечивают точность не менее 25 мкм. Маски подразделяются:

1) по назначению – прецизионные, высокотемпературные для работы при высоких температурах, низкотемпературные для низких температур;

2) по материалу – металлические (монометаллические, биметаллические);

3) по конструкции – однослойные, двухслойные;

4) по технологии изготовления – механическим способом, электронно-лучевым, фотолитографическим и др.

На практике применяется фотолитографический способ. Материал для изготовления масок должен выдерживать температурные условия вакуумного напыления и не выделять при этом газов и паров, не реагировать с напыляемым материалом и быть достаточно жестким и упругим, чтобы обеспечить плотный «прижим» к подложке и точное воспроизведение размеров элементов. Кроме того, материал маски должен иметь возможно более низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) для того, чтобы при нагреве подложки тепловое расширение маски не вызывало изменения геометрических размеров элементов. Маска из такого материала должна иметь и сохранять в процессе эксплуатации требуемую точность, зависящую как от размера и конфигурации окон, так и от размеров рабочего поля маски, которое обычно соответствует размеру подложки. Этим требованиям отвечают никель, молибден, хром, тантал, бериллиевая бронза, инструментальная сталь.

Выбор материала зависит от требований эксплуатации маски и возможности ее технологической обработки. Для термостабильных и механически прочных масок выбирают молибден, вольфрам, никель, железо. Для масок с высокой точностью применяют никель, бронзу. Химически стойкие маски изготавливаются из вольфрама, молибдена.

Монометаллические маски из фольги толщиной 50–100 мкм можно изготавливать различными способами, но чаще применяют фотолитографический способ. На рис. 14, а показан простой способ изготовления монометаллической маски, где на заготовку из фольги 2 наносится фоторезист 1 и производится его фотообра-

ботка. Обратная сторона покрывается защитным лаком 3. После травления фольги фоторезист и защитный лак удаляются. Этот способ имеет большую погрешность контура e из-за подтравливания маски под фоторезистом.

Более точный способ показан на рис. 14, б, когда фоторезист наносится с двух сторон фольги и на специальном приспособлении выполняются его двухстороннее экспонирование и последующая обработка. При этом погрешность контура e меньше и четкость кромок выше.

На рис. 15 приведен технологический маршрут производства съёмной маски.

Наибольшее распространение в вакуумной технологии нашли **биметаллические маски**. Такие маски применяют для изготовления тонкопленочных резисторов, конденсаторов, коммутационных проводников, а также контактных площадок.

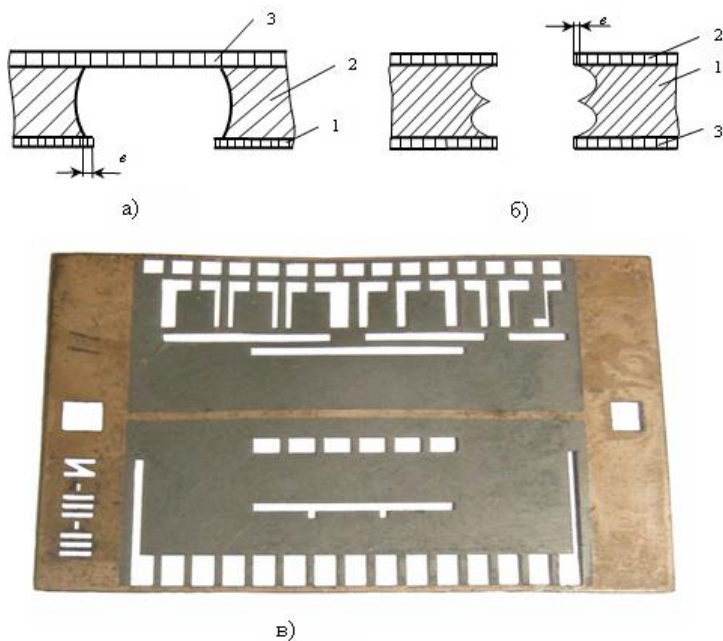


Рис. 14. Способы изготовления масок (а, б) и металлическая маска (в)

Биметаллические двухслойные (в дальнейшем – просто биметаллические) маски состоят из двух слоев металла. Один, более толстый (100–150 мкм), служит основой и обеспечивает жесткость и механическую прочность маски. Другой, относительно тонкий (15–20 мкм), является образующим и обеспечивает высокую точность воспроизводимого рисунка. Наиболее распространены биметаллические маски типа бериллиевая бронза – никель (основа – бериллиевая бронза, а образующий слой – никель). Металл для основного слоя биметаллических масок должен химически растворяться в растворителях, не действующих на образующий слой.

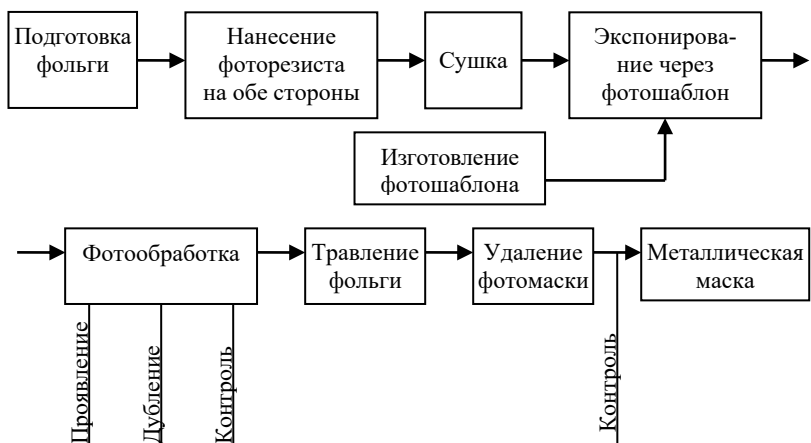


Рис. 15. Технологический маршрут производства свободной маски

Технологический процесс изготовления биметаллических масок типа бериллиевая бронза – никель, сталь – никель выполняется следующим образом (рис. 16): на предварительно обработанную (терморихтовка, полировка и т. д.) заготовку маски наносят слой фоторезиста.

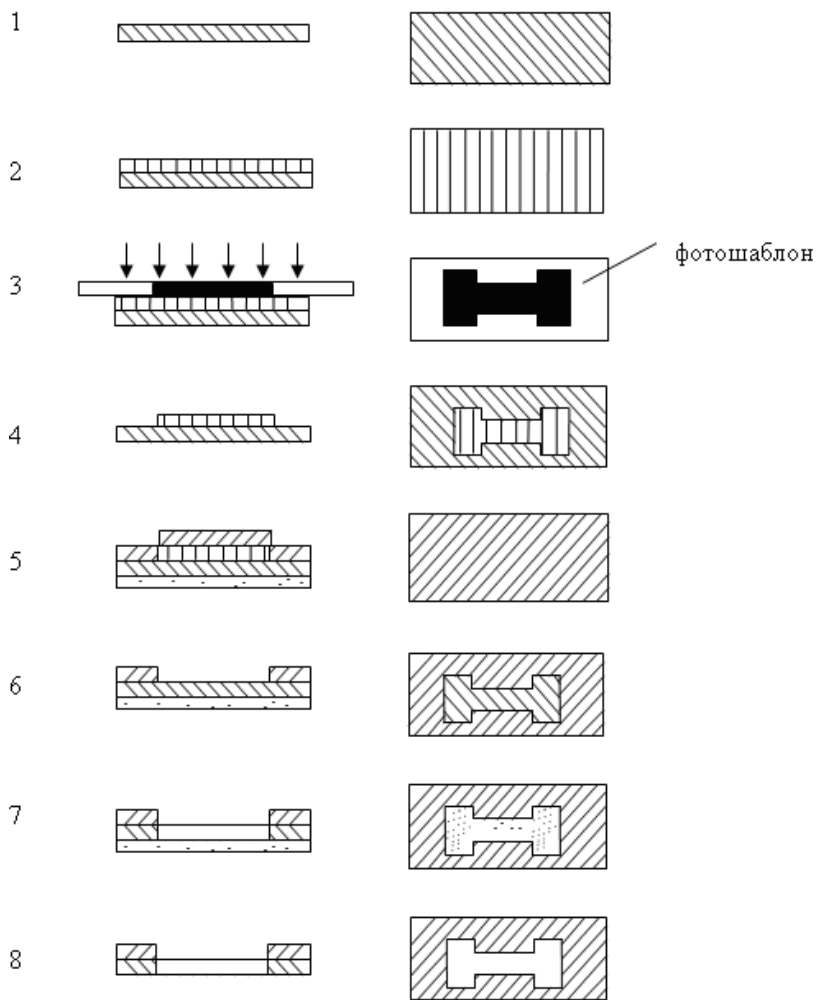


Рис. 16. Технологический маршрут изготовления биметаллической свободной маски: 1 – лента бериллиевой бронзы; 2 – нанесение фоторезиста; 3 – экспонирование; 4 – фотообработка; 5 – нанесение слоя защитного лака с обратной стороны ленты и осаждение никеля на незащищенные участки; 6 – снятие фоторезиста; 7 – травление бериллиевой бронзы; 8 – снятие защитного лака

Покрытую фоторезистом заготовку экспонируют контактным способом через фотошаблон будущей маски. После проявления засвеченные участки фоторезиста вымывают, а незасвеченные – задубливают. Подготовленную таким образом заготовку покрывают с обратной стороны защитным слоем лака ХВЛ и для фотохимического процесса помещают в гальваническую ванну, где на незащищенные лаком и фоторезистом участки бронзы осаждается слой никеля толщиной 10–12 мкм.

После никелирования заготовку тщательно промывают, а затем с нее смывают в соответствующем растворителе задублинные участки фоторезиста. В результате такой обработки на заготовке образуется никелевая маска, с большой точностью повторяющая рисунок фотошаблона. Завершающей операцией процесса изготовления биметаллической маски является вытравливание бериллиевой бронзы с незащищенных никелем участков. Травление производят в растворе хромового ангидрида с серной кислотой. После этого с обратной стороны заготовки снимают защитный слой лака, и в таком виде маска поступает в эксплуатацию.

В процессе эксплуатации маска постепенно теряет свою точность вследствие осаждения на нее тонкопленочных слоев. Обычно биметаллические маски выдерживают порядка ста циклов осаждения пленок.

Высокая точность изготовления, легкость воспроизведения процессов делают биметаллические маски в настоящее время наиболее распространенными в производстве тонкопленочных микросхем.

Существенным ограничением в применении биметаллических масок является их деформация при повышенном нагреве из-за разницы коэффициентов линейного расширения образующего слоя и основы (например, ТКЛР бериллиевой бронзы $17 \cdot 10^{-6}$ 1/град, ТКЛР никеля $13 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Поэтому при повышенных температурах применять их не рекомендуется.

2.3. Технология изготовления резистивных тонкопленочных плат МСБ с применением фотолитографии

Фотолитография – совокупность фотолитографических процессов для получения необходимой конфигурации тонкопленочных элементов. Метод фотолитографии или избирательного фотохимического травления сплошных тонкопленочных слоев, нанесенных на подложку, позволяет создавать весьма сложный рисунок микросхемы с большой точностью геометрических размеров и плотностью размещения элементов в слое. Благодаря этому фотолитография успешно конкурирует с методом съемных масок.

Данный метод широко распространен благодаря высокой производительности (обработка осуществляется по всей подложке одновременно) и разделению основных операций (нанесение пленки и оформление контуров на фоторезисте) во времени.

В зависимости от последовательности выполнения основных операций все методы можно разделить на две группы:

- 1) нанесение пленки предшествует оформлению контуров на фоторезисте;
- 2) оформление контуров из фоторезиста предшествует нанесению пленки.

В обеих группах методов для получения рисунка схемы непосредственно на подложке используется фотолитография.

Однако основным недостатком фотолитографии является воздействие реактивов как на подложку, так и на ранее нанесенные слои. После каждой очередной фотохимической обработки необходимо производить тщательную очистку подложки от следов реактивов, иначе невозможно обеспечить хорошую адгезию. Поэтому сначала наносят все слои пленок, а затем последовательным фотохимическим травлением получают их контуры. Но таким способом можно получить рисунок не более чем двух слоев и, следовательно, невозможно перекрестить два проводника, разделенных диэлектриком, и изготовить тонкопленочный конденсатор. Следо-

вательно, этот способ рекомендуется применять для точных микросхем, содержащих не более двух слоев пленочных элементов. Это прежде всего группы резисторов, где есть резистивная пленка для резисторов и проводящая пленка для их коммутации.

Технологический маршрут изготовления групп пленочных элементов с оформлением их контуров после нанесения пленки. Этот метод в литературе известен как селективное травление. Селективное травление иллюстрируется рис. 17, где показано получение одного слоя элементов. На подложку наносится сплошная пленка каким-либо из рассмотренных выше способов. Пленка может быть из одного материала или из нескольких слоев различных материалов. Например, для повышения адгезии предназначен подслой из активного металла, а для защиты от коррозии сверху – еще слой химически инертного металла. На следующей операции наносится сплошной слой фоторезиста, производится его сушка и экспонирование, а потом проявление и термообработка. Затем происходит селективное травление участков пленки, незащищенных задубленным фоторезистом. Для непрерывного омывания поверхности свежими порциями травитель перемещается или взбалтывается. Для поддержания постоянства состава травителя применяют разбрызгивание.

Травление в фотолитографическом процессе является одной из ответственных операций, так как геометрические размеры пленочного резистора должны выдерживаться с высокой точностью, что в конечном счете определяет точность их номинала. Метод травления и травильный раствор должны обеспечивать равномерность травления, целостность защитной фоторезистивной пленки и отсутствие нерастворимых продуктов реакции при оптимальной скорости травления. Кроме того, отношение скорости бокового травления к скорости травления в глубину должно быть минимальным. Адгезия фоторезистивных пленок в травителе не должна ухудшаться, чтобы не было отслоений. Образование пузырей нежелательно, так как их адсорбция на краях фоторезиста приводит к неравномерному процессу травления.



Рис. 17. Схема техпроцесса последовательности изготовления тонкопленочного элемента

Нарушение фоторезистивной пленки в виде разрушений, отслаиваний указывает на непригодность совмещенного использования травителя и фоторезиста. Следует также избегать применения травителя избыточной продолжительности воздействия.

В соответствии с технологическим процессом фотолитографии используются промышленные установки для обезжиривания ситалловых подложек и снятия фоторезиста (ПВХО-ГС-60-1), проявления фоторезиста (ПХО-ГС-60) и для травления пленок (например, РВХО-ГС-60).

Последней операцией является удаление задубленного фоторезиста органическими растворителями, которые не оказывают действия на защищаемую пленку.

Технологический маршрут изготовления групп тонкопленочных элементов из нескольких слоев. Для создания конфигу-

рации пленочных элементов в процессе фотолитографии используют селективное растворение многослойных структур, осажденных в едином технологическом цикле вакуумного напыления. На подложки последовательно напыляют резистивную пленку и структуру контактных площадок, состоящую обычно из двух-трех материалов. Затем по многослойной структуре проводят фотолитографию по каждому или группе слоев, получая таким образом конфигурацию тонкопленочных резисторов.

Рассмотрим технологический процесс изготовления тонкопленочной резистивной схемы на примере обработки участка подложки, на котором размещаются нихромовый резистор прямоугольной формы и медные контактные площадки, покрытые никелем. Последовательность обработки такого участка схематично показана на рис. 18 и 19. ТПР изготавливают при проведении двух фотолитографий с использованием фотошаблонов ФШ1 и ФШ2 в различных вариантах.

Вариант 1. Первую фотолитографию проводят для получения слоя проводников и контактных площадок (рис. 18, позиции 3, 4, 5, 6, 7), а вторую – для получения конфигурации резистивного слоя (позиции 8, 9, 10, 11, 12).

Вариант 2. Первую фотолитографию выполняют для суммарного резистивного и проводящего слоев (рис. 19, позиции 3, 4, 5, 6, 7, 8), а вторую фотолитографию – для снятия проводящего слоя с резистивной пленки избирательным травлением (позиции 9, 10, 11, 12, 13).

При двойной фотолитографии производят тщательный выбор травителей, селективно воздействующих на материал или группу материалов в соответствии с конструкцией тонкопленочного резистора. Для избирательного травления резистивных пленок используют специальные травители, состав и способ изготовления которых излагаются в соответствующих технологических инструкциях. В ряде случаев резистивные сплавы могут содержать труднорастворимые компоненты и образовывать побочные соединения, снижающие скорость травления и (или) ухудшающие качество

контура элементов. В этих случаях может быть использован метод обратной фотолитографии (метод контактной маски). Некоторые группы травителей для проведения фотолитографических процессов с избирательным травлением структур резистивная пленка – контактная площадка приведены в табл. 11.

Таблица 11. Травители для избирательного травления структур ТПР

Структура ТПР	Травители	Структура ТПР	Травители
Хром – медь – никель Cr–Cu–Ni	Для Cu–Ni 38 % HNO ₃ Для Cr р-р состава: NaOH – 20 г/л K ₃ Fe(CN) ₆ – 300 г/л Вода – 1 л	МЛТ-3М-ванадий – медь V–Cu	Для Cu–V р-р состава: H ₃ PO ₄ – 40 мл HNO ₃ – 10 мл CH ₃ COOH – 10 мл Вода – 40 мл Для МЛТ-3М смесь состава: HCl – 45 мл HF – 5 мл Вода – 50 мл или HCl – 30 мл HF – 10 мл Для Cu любой из травителей
Нихром – медь – никель NiCr–Cu–Ni	Для Cu–Ni 38 % HNO ₃ Для NiCrHCl		
РС-3710-хром – медь – никель	Для Cu–Ni 38 % HNO ₃		
РС-3710-Cr–Cu–Ni	Для Crp-р состава: NaOH – 20 г/л K ₃ Fe(CN) ₆ – 300 г/л Вода – 1 л Для РС-3710 смесь состава: HNO ₃ – 30 г	МЛТ-3М-нихром – медь	Для Cu (см.выше) Для NiCr – соляная кислота Для МЛТ-3М смесь состава: HNO ₃ – 35 мл HF – 5 мл Вода – 60 мл

Окончание табл. 11. Травители для избирательного травления структур ТПР

Структура ТПР	Травители	Структура ТПР	Травители
Рений – хром – никель Re–Cr–Ni	HF – 10 г HCl – 0,50 г Для Ni 38 % HNO ₃ Для Re р-р состава: NaOH – 20 г/л K ₃ Fe(CN) ₆ – 300 г/л Вода – 1 л	МЛТ-3М-ванадий – алюминий (Cu) V–Al	Для Al–V р-р состава: H ₃ PO ₄ – 40 мл HNO ₃ – 10 мл CH ₃ COOH – 10 мл Вода – 40 мл Для МЛТ-3М смесь состава: HCl – 45 мл HF – 5 мл Вода – 60 мл
PC-3710-нихром – медь – никель NiCr–Cu–Ni	Для Cu–Ni 38 % HNO ₃ Для PC-3710 HNO ₃ – 30 г HF – 10 г HCl – 0,5 г Для NiCrHCl		

Технологический процесс в рассматриваемых вариантах состоит из трех операций: 1) нанесение на подложку сплошных пленок нихрома, меди и никеля (рис. 18 и 19); 2) фотохимическое травление рисунка контактных площадок с использованием фотошаблона ФШ1; 3) фотохимическое травление рисунка резисторов с использованием фотошаблона ФШ2. Рассмотрим подробно каждую из этих операций.

Операция нанесения сплошных пленок производится, как правило, в непрерывном вакуумном цикле методом термического

испарения или ионно-плазменного распыления. Катодное распыление обычно не применяется, поскольку промышленные установки, предназначенные для осаждения пленок этим методом, не оборудованы устройством для смены катодов в вакууме и, следовательно, на них не может быть распылен только один материал.

Остановимся на процессе нанесения сплошных слоев никрома, меди и никеля методом ионно-плазменного распыления на установке, оборудованной устройствами для смены подложек и мишеней на рабочей позиции в непрерывном вакуумном цикле.

Перед началом технологического процесса рабочую камеру протирают батистом, смоченным в спирте, и очищают пылесосом. Затем в рабочую камеру устанавливают мишени никрома, меди и никеля, а также подложки в специальных держателях, после чего камеру закрывают.

Для обезгаживания рабочей камеры в ней предварительно создают вакуум 0,001–0,0001 Па, а затем через игольчатый натекаТЕЛЬ напускают в камеру инертный газ (обычно аргон). Когда давление в камере достигнет 0,1 Па, включают накал катода и подают напряжение на анод, в результате между накалившимся катодом и анодом возникает дуговой разряд.

При установившихся параметрах дугового разряда на рабочую позицию подводят мишень никрома и одну из подложек. Заслонка, перекрывающая поток распыляемых частиц, должна быть при этом закрыта. Затем включают электронагреватель и нагревают подложку до 200 градусов. Одновременно на мишень подают высокое напряжение порядка 2,5 кВ, что приводит к интенсивной бомбардировке мишени ионами аргона и распылению никрома.

Первоначально мишень «тренируют», то есть в течение 8–10 минут поверхностный, загрязненный слой материала мишени осаждают на заслонку. По окончании тренировки заслонку открывают и осаждают распыляемый никром на нагретую подложку. Когда толщина слоя никрома достигнет требуемой величины, о чем бу-

дет свидетельствовать показание измерительного прибора, заслонку закрывают, снимают высокое напряжение с мишени и на рабочую позицию переводят мишень меди.

Тренировку медной мишени производят при напряжении 3 кВ в течение 5 мин, после чего на подложку осаждают пленку меди. Затем таким же образом поверх меди наносят слой никеля, установив на рабочую позицию соответствующую мишень и подав на нее напряжение 2,5 кВ.

В дальнейшем повторяют процесс осаждения трехслойной пленочной структуры нихром – медь – никель, устанавливая по очереди на рабочую позицию остальные подложки, загруженные в камеру.

По окончании процесса нанесения сплошных слоев на все подложки выключают питание электронагревателя, анода и накала катода. Затем перекрывают натекатель аргона и, остудив подложки в вакууме до температуры 50–60 градусов, запускают в камеру воздух. Извлеченные из камеры подложки укладывают в тару и передают на следующую операцию.

Рассмотрим в качестве примера процесс получения рисунка тонкопленочной резисторной схемы методом фотолитографии на основе позитивного фоторезиста.

Вариант 1 (рис. 18). На первой операции (позиции 3, 4, 5, 6, 7) фотолитографии получают рисунок контактных площадок. Для этого подложку с осажденными слоями нихрома, меди и никеля устанавливают на центрифугу и наносят на ее поверхность каплю фоторезиста. При вращении центрифуги со скоростью 2 000 об/мин капля растекается по всей подложке тонким равномерным слоем. Нанесенную таким образом пленку фоторезиста подсушивают в течении 10–15 мин при температуре 150 градусов, поместив подложку в термостат.

Затем на подложку накладывают шаблон Ш1 с позитивным (непрозрачным) изображением контактных площадок и производят засветку ультрафиолетовым светом. Время экспонирования

ния зависит от химического состава и толщины фоторезистной пленки.

После экспонирования подложку опускают в раствор проявителя, где фоторезист вымывается с облученных участков. Далее подложку промывают в проточной дистиллированной воде и сушат в струе теплого воздуха до полного высыхания.

Для придания оставшимся на подложке непроявленным участкам фоторезиста большей химической стойкости к различным травителям производят термообработку подложки в термостате при температуре 150 °С в течение 10–15 мин. На этом заканчивается процесс образования защитного рельефа.

В дальнейшем подложку опускают в ванну с разбавленной азотной кислотой (HNO_3), где в течение 0,5 мин с незащищенных фоторезистом участков стравливаются никель и медь, образуя рисунок контактных площадок, а оставшийся на контактных площадках фоторезист смывают путем последовательного погружения в эмалированные кюветы с диоксаном. После этого подложку промывают в проточной дистиллированной воде и сушат в струе теплого воздуха до полного высыхания.

При получении рисунка резисторов процесс фотохимического травления в принципе аналогичен предыдущему (позиции 8, 9, 10, 11, 12). Разница заключается лишь в том, что в данном случае при экспонировании используют фотошаблон Ш2 с позитивным изображением резисторов, а для травления нихрома применяют концентрированную соляную кислоту (HCl), подогретую до 60–70 °С.

Вариант 2 (рис. 19). Во втором варианте технологические процессы фотолитографии выполняют в обратном порядке: на первой операции (позиции 3, 4, 5, 6, 7, 8) фотолитографии получают рисунок контура резистора с использованием фотошаблона ФШ2, а при второй операции (позиции 9, 10, 11, 12, 13) формируют контактные площадки резистора (фотошаблон Ш1).

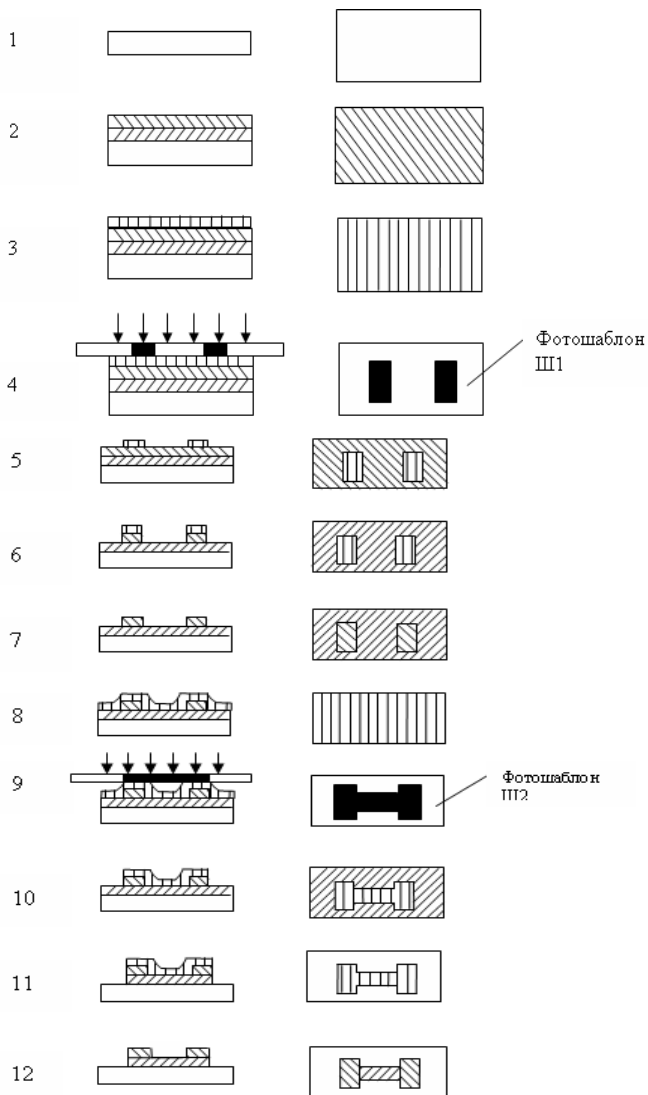


Рис. 18. Получение резистивного элемента методом двойной фотолитографии (первый вариант): 1 – подложка; 2 – напыление сплошных резистивного и проводящего слоев; 3 – нанесение фоторезиста; 4 – экспонирование; 5 – фотообработка; 6 – травление проводящего слоя; 7 – снятие фоторезиста; 8 – нанесение фоторезиста; 9 – экспонирование, 10 – фотообработка; 11 – травление резистивного слоя; 12 – снятие фоторезиста

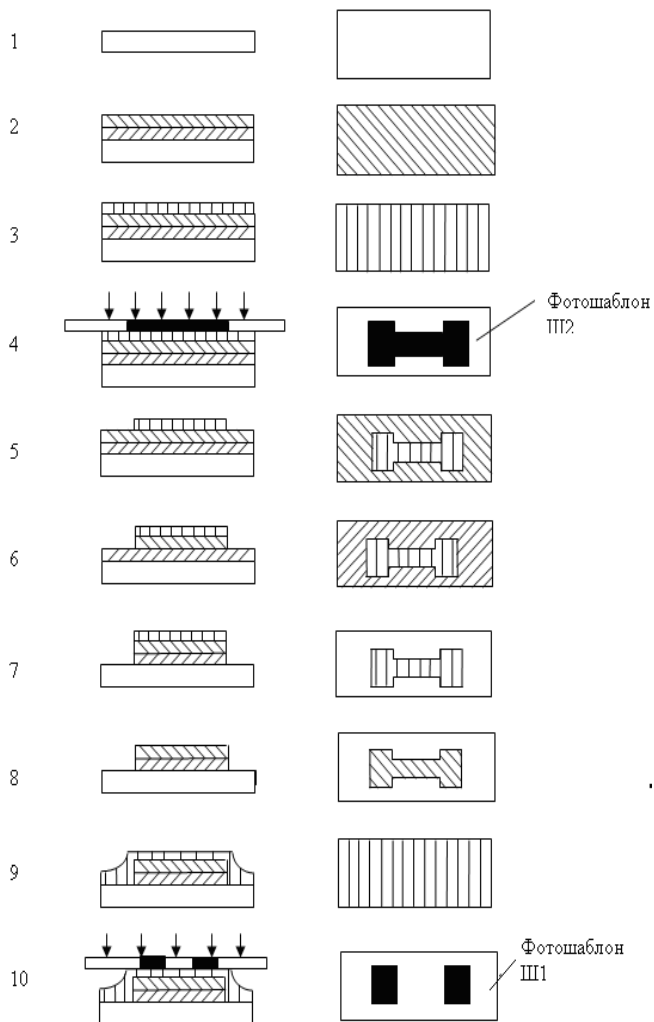


Рис. 19. Получение резистивного элемента методом двойной фотолитографии (второй вариант): 1 – подложка; 2 – напыление сплошных резистивного и проводящего слоев; 3 – нанесение фоторезиста; 4 – экспонирование; 5 – фотообработка; 6 – травление проводящего слоя; 7 – травление резистивного слоя; 8 – снятие фоторезиста; 9 – нанесение фоторезиста; 10 – экспонирование

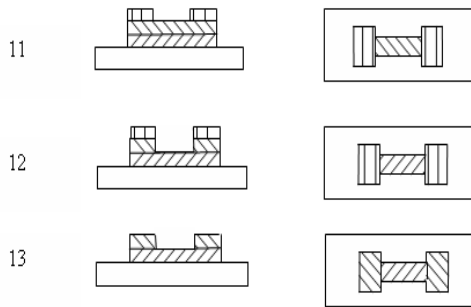


Рис. 19. Получение резистивного элемента методом двойной фотолитографии (второй вариант): 11 – фотообработка; 12 – травление проводящего слоя; 13 – снятие фоторезиста

Процесс формирования рисунка той же микросхемы методом фотолитографии на основе негативного фоторезиста отличается от рассмотренного выше типом фотошаблона (здесь применяют негативы), режимами экспонирования и термообработки, а также составом проявляющего раствора.

Наряду с химическим травлением тонких пленок применяют электрохимическое травление, характер и скорость которого определяется составом, температурой электролита и плотностью тока. Электрохимическое травление металлических пленок проводится в относительно инертных электролитах и практически не воздействует на подложку. Различие потенциалов растворения металлов в электролитах позволяет использовать электрохимическое травление (растворение) при создании конфигурации многослойных металлических структур. При одинаковой химической активности металлов многослойной структуры посредством подбора электролитов проводят процесс избирательного (селективного) травления.

Кроме указанных методов можно использовать **селективное ионное травление**. Этот метод используется в тех случаях, когда материал пленки трудно поддается химическому травлению (например, кермет). Сущность метода заключается в удалении материала высокочастотной ионной бомбардировкой (2–5 кВ). Метод основан на

равенстве удаления (распыления) как материала пленки, так и фоторезиста. Если пленка фоторезиста толще осажденной пленки, то после удаления пленки материала слой фоторезиста остается.

Преимущества: обеспечивается высокая точность кромок (отсутствует подтравливание пленки); метод универсален, может быть использован для различных материалов; отсутствует химическое воздействие реактивов на пленку и подложку. Недостаток метода – малая скорость распыления.

Технологический маршрут изготовления тонкопленочного резистора комбинированным методом. Практическое применение нашли также комбинированные варианты изготовления тонкопленочных резисторов, при которых используются методы фотолитографические и свободной маски.

При комбинированном методе ширину резисторов целесообразно формировать с помощью фотолитографии, а длину – с помощью свободной маски. В соответствии с этим последовательность нанесения слоев следующая: напыление сплошной резистивной пленки; напыление проводников и контактов через свободную маску (формирование длины резисторов); фотолитография по резистивному слою (формирование ширины резисторов).

Следовательно, при фотолитографическом и комбинированном методах под проводящим слоем сохраняется резистивный подслой. Поскольку все резистивные материалы разрабатываются с учетом обеспечения высокой адгезии к подложкам, резистивный подслой обеспечивает в конечном счете прочность сцепления с ней проводников и контактов.

На рис. 20 показан один из технологических вариантов изготовления комбинированным методом. На поверхность подложки напыляется сплошной, например резистивный слой, а затем с помощью свободной маски напыляется проводящий материал (например, медь), после этого на центрифуге наносится фоторезист, на котором экспонируется узор резисторов. В результате этого на подложке получается пленочный резистор с контактными площадками.

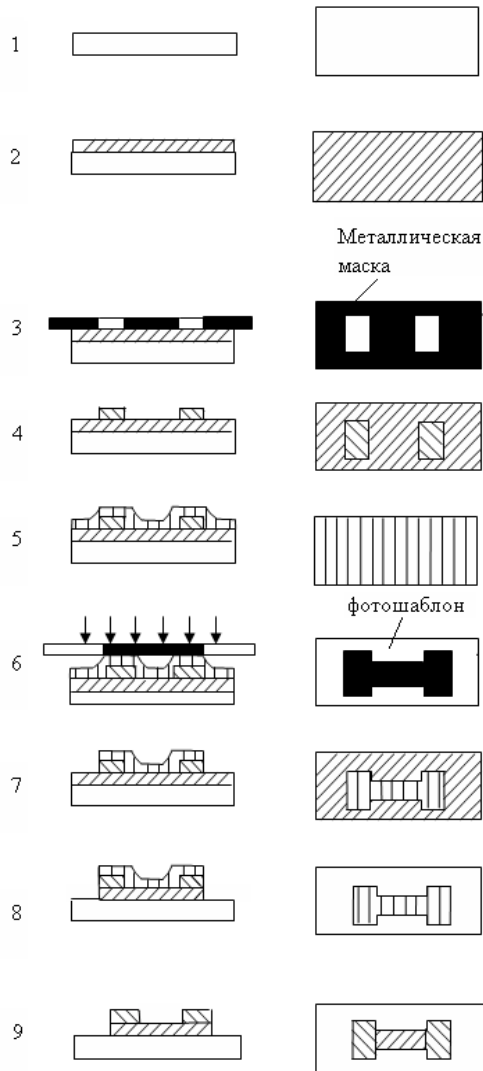


Рис. 20. Технологический маршрут изготовления тонкопленочного резистора комбинированным методом: 1 – подложка; 2 – напыление сплошного резистивного слоя; 3 – напыление контактных площадок через съемную маску; 4 – рисунок полученных слоев после снятия маски; 5 – нанесение фоторезиста; 6 – экспонирование через фотошаблон; 7 – фотообработка; 8 – травление резистивного слоя; 9 – снятие фоторезиста

При выборе метода создания конфигурации пленочных элементов учитывают технологичность, разрешающую способность, степень отработанности технологического процесса.

Технологический маршрут изготовления тонкопленочных резистивно-емкостных микросхем комбинированным методом приведен на рис. 21.

Этот вариант изготовления тонкопленочных элементов аналогичен рассмотренному варианту производства резистора с некоторым отличием: на поверхность подложки последовательно напыляют сплошные резистивный и проводящий слои, а затем спомощью свободных масок формируют все слои конденсатора и их соединения. Конфигурации резистора и контактных площадок формируют фотолитографией.

Технологический маршрут изготовления тонкопленочного элемента методом металлической контактной маски. Метод контактной маски (обратной фотолитографии) состоит в предварительном формировании на поверхности подложки фоторезистивной или металлической маски из хорошо поддающегося травлению материала (медь, алюминий и другие). Эти операции для метода металлической контактной маски показаны на рис. 22 (позиции 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7). Затем на поверхность подложки с металлической контактной маской напыляют сплошной слой резистивного материала, например хрома (позиция 8). Далее используют травитель для удаления контактной маски. Травитель при этом проникает через трещины и разрывы на ступеньках резистивной пленки, в результате чего она отслаивается на этих участках. Таким образом, толщина слоя контактной маски должна быть большой настолько, чтобы на ступеньках происходило разрушение резистивной пленки, но малой настолько, чтобы исключить заметное подтравливание маски и обеспечить высокую точность рисунка. Оптимальная толщина маски составляет 0,2–0,3 мкм.

После травления на подложке остается конфигурация резистивной пленки (позиция 9). Метод контактной маски позволяет получить пленочные элементы любой сложности с высокой точностью. Основной недостаток контактных масок – их однократное использование. В тех случаях, когда требуется невысокая точность, применяют свободные маски.

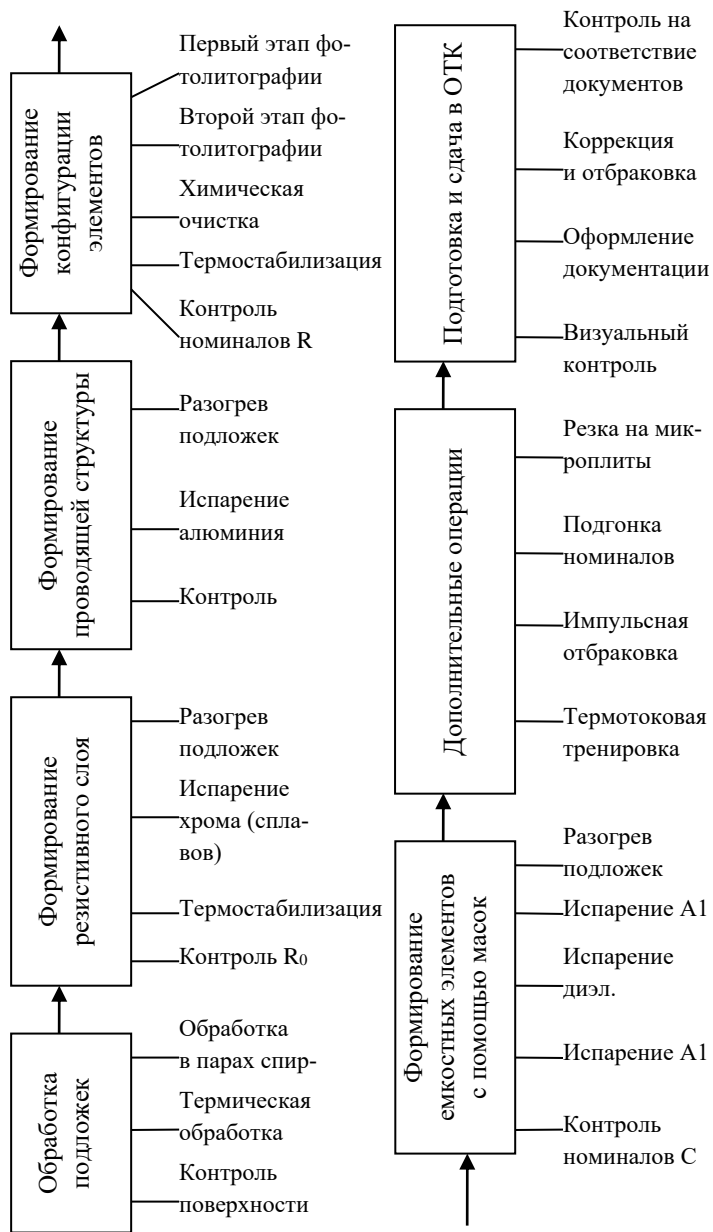


Рисунок 21. Технологический маршрут изготовления тонкопленочной резистивно-емкостной микросхемы комбинированным методом

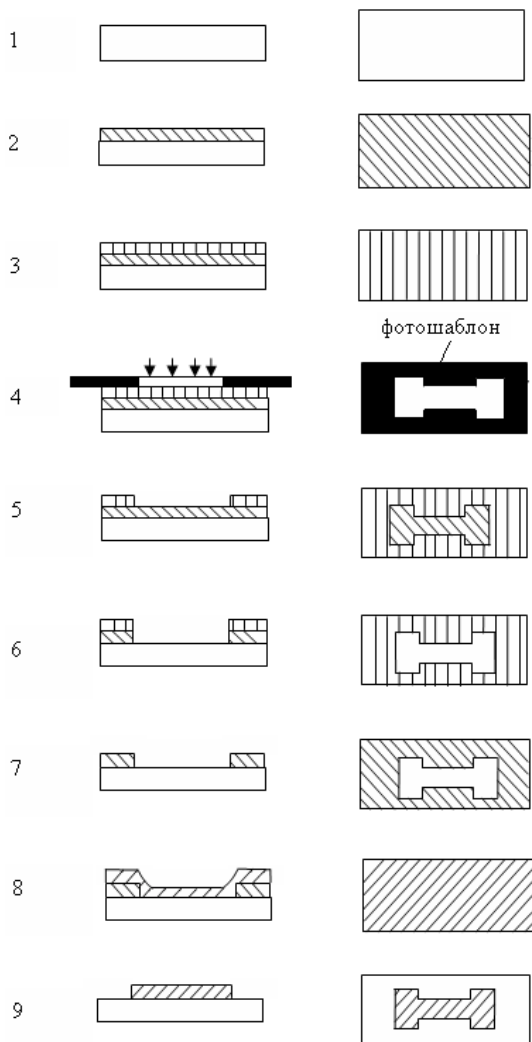


Рис. 22. Способ получения пленочного элемента методом металлической контактной маски: 1 – подложка; 2 – напыление материала контактной маски (алюминий или медь); 3 – нанесение фоторезиста; 4 – экспонирование; 5 – фотообработка фоторезистивного слоя; 6 – травление материала через фоторезистивную маску; 7 – снятие фоторезиста; 8 – напыление материала пленочного элемента; 9 – травление материала контактной маски

2.4. Технологический маршрут изготовления резистивно-емкостных и тонкопленочных плат МСБ методом термического испарения через свободные маски

Пассивная часть тонкопленочной гибридной схемы представляет собой многослойную систему, в которой резистивный слой обычно является нижним (первым в порядке напыления). Толщина резистивного слоя примерно на порядок меньше толщины проводящего слоя, который должен частично перекрывать резистивный слой для образования надежного контакта (см. рис. 8). При ином порядке напыления тонкая резистивная пленка, перекрывая проводящую, создает резкую ступеньку, что при наличии внутренних напряжений приводит к нарушению целостности резистивной пленки и электрического контакта.

Как следует из рис. 8, рабочая длина резистора L формируется в результате получения проводящего рисунка. За счет проводящего рисунка обеспечиваются также перекрытия b_1 и уширения b_2 , необходимые для компенсации погрешности совмещения резистивного и проводящего рисунков. При выборе метода формирования резистивного и проводящего рисунка (фотолитографический, масочный или комбинированный) руководствуются технологическими ограничениями, присущими каждому из двух основных методов (табл. 12).

Метод формирования рисунков необходимо выбирать на этапе конструирования резисторов при определении минимальной ширины резистора. Наиболее производительным и экономичным является метод свободной маски. Он заключается в последовательном напылении через свободные маски резисторов, проводящих слоев в качестве проводников, контактных площадок, верхних и нижних обкладок конденсаторов и диэлектрика. При отсутствии конденсаторов и пересечений проводников изготовление пассивной части схемы заканчивается напылением через маску защитного слоя (незащищенными остаются контакты для монтажа навесных элементов на подложку и периферийные контакты для монтажа подложки в корпус).

Таблица 12. Сравнительные параметры методов

Характеристики	Масочный метод	Фотолито-графический метод
Максимальное отношение L/B	10	150
Минимальная ширина резистора, мкм	200	100
Точность размеров элементов рисунка, мкм	±10	±5
Минимальные перекрытия и уширения, мкм	200	100
Минимальные расстояния между элементами в одном слое, мкм	200	100

В вакуумной технологии различают два способа осаждения многослойных тонкопленочных структур: отдельный и непрерывный.

При отдельном способе для осаждения каждого слоя пленочной структуры на одну или несколько подложек требуется отдельный вакуумный цикл, который выполняется на отдельной технологической установке. При таком способе нет взаимного загрязнения испаряемых материалов, менее сложна технологическая оснастка в вакуумной камере, появляется возможность межоперационного контроля элементов микросхемы.

При непрерывном способе осаждение всех слоев производится за один вакуумный цикл, исключается воздействие атмосферного загрязнения при осаждении каждого последующего слоя, значительно уменьшается время изготовления микросхемы за счет уменьшения количества циклов откачки вакуумной камеры, нагре-

ва и охлаждения подложки, легче обеспечивается автоматизация процесса. При этом вакуумная камера технологической установки должна быть оснащена устройствами для смены масок, испарителей и подложек.

Рассмотрим технологические особенности построения вакуумного цикла как при раздельном, так и непрерывном способах осаждения слоев микросхемы.

Нанесение слоев раздельным способом. Технологический процесс нанесения слоя микросхемы раздельным способом осуществляется на вакуумной установке, рабочая камера которой оборудована устройствами карусельного типа для смены нескольких испарителей и подложек, совмещенных с масками, и подвода их на позиции испарения.

Рассмотрим технику нанесения резистивных и проводящих слоев на такой установке на примере процесса осаждения пленки меди с подслоем хрома, используемой для создания контактных площадок и проводников тонкопленочной микросхемы (рис. 23). Подслой хрома в данном случае осаждают для улучшения адгезии пленки меди к подложке.

Перед началом технологического процесса стенки рабочей камеры установок и внутрикамерные устройства протирают батистом, смоченным в спирте, и очищают пылесосом от остатков ранее распыленных в камере материалов. После этого испарители загружают навесками хрома и меди, а на соответствующую карусель устанавливают подложки, закрепленные на специальных держателях вместе с масками, и контрольные образцы («свидетели») для измерения сопротивления пленки в процессе осаждения.

По окончании загрузки закрывают рабочую камеру и производят откачку атмосферного воздуха из нее. При достижении вакуума в рабочей камере $1 \cdot 10^{-4}$ Па включают электронагреватель подложек и нагревают подложки до температуры 200–250 °С. Эту температуру поддерживают путем регулировки тока нагревателя до окончания процесса осаждения пленок.

Когда подложки нагреваются до нужной температуры, на позицию испарения подводят испаритель хрома и подают на него напряжение. Силу тока, проходящего через испаритель, постепенно увеличивают в течение 1–2 мин до рабочей величины, которая определяется конструкцией испарителя. Вакуум в рабочей камере при этом ухудшается, так как при нагреве с поверхностей испарителя и навески хрома происходит активное газоотделение.

После того как газоотделение значительно уменьшится и вакуум восстановится до прежнего значения, открывают заслонку, перекрывающую поток испаряемых частиц, и производят осаждение пленки хрома на подложку и на «свидетель», находящиеся в это время напротив позиции испарения. По мере увеличения толщины пленки сопротивление «свидетеля» уменьшается, и, как только оно достигнет требуемой величины, заслонку закрывают, а на позицию испарения переводят следующую подложку. Затем снова открывают заслонку и повторяют процесс осаждения хрома, пока он не будет нанесен на все подложки, загруженные в камеру.

По окончании процесса осаждения подслоя на последнюю подложку, находящуюся в камере, закрывают заслонку и снижают ток испарителя хрома до нуля. Затем на позицию испарения переводят испаритель меди и производят осаждение меди на подложки в том же порядке, как и хрома. Но поскольку медь испаряется из расплавленного состояния, то для предотвращения ее разбрызгивания сначала устанавливают ток через испаритель, равный примерно $\frac{2}{3}$ рабочей величины. После расплавления меди ток через испаритель плавно увеличивают еще на $\frac{1}{3}$ и после этого открывают заслонку.

Закончив осаждение слоя меди на все подложки, выключают электронагреватель и дают остыть подложкам в вакууме до температуры 50–60 °С. После этого перекрывают вакуумным затвором откачной патрубков рабочей камеры и напускают в нее воздух.

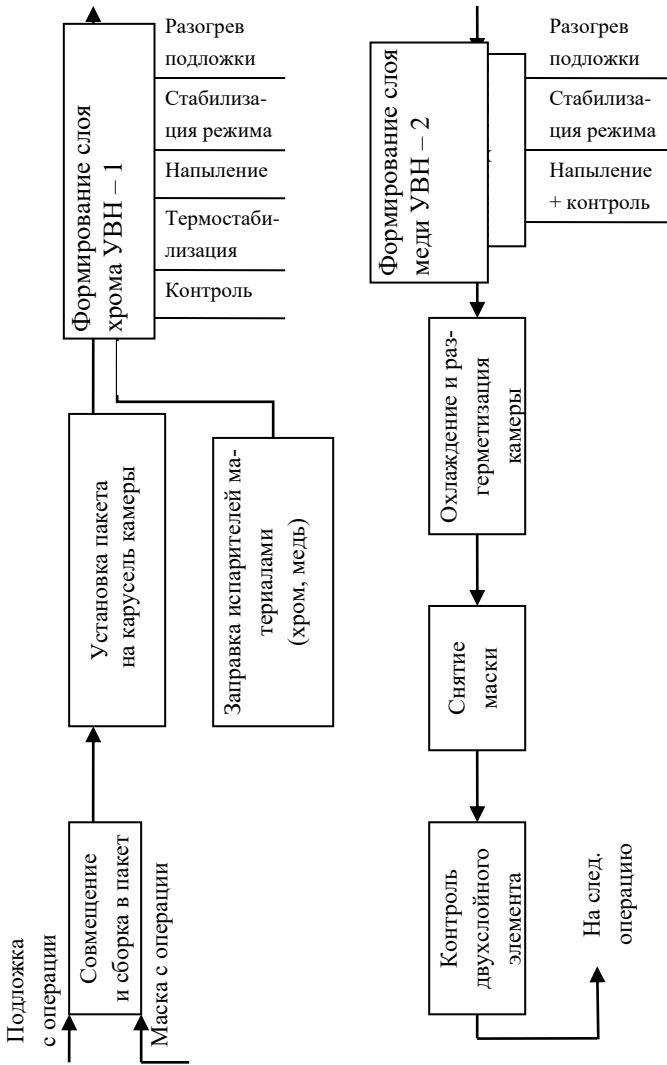


Рис. 23. Технологический маршрут изготовления тонкопленочного элемента при раздельном методе напыления

Технологические процессы нанесения проводящих слоев других материалов, а также резистивных слоев отличаются от приведенного выше только режимами осаждения – вакуумом в рабочей камере установки, температурой подложки и скоростью осаждения пленки. Последний параметр контролируется либо непосредственно в процессе осаждения пленки с помощью специальных измерительных приборов, либо задается косвенным путем – величиной тока через испаритель, от которого зависит температура испарения. При этом пользуются зависимостью скорости осаждения при известном расстоянии от испарителя до подложки.

Для напыления материала последующего слоя на поверхность подложки или на ранее напыленный слой используют вторую вакуумную установку с испарителем, заправленным требуемым материалом. Технологический процесс напыления этого материала аналогичен предыдущему, но предварительно производят смену маски. Процесс совмещения маски с напыленным слоем выполняют вне вакуумной камеры вручную с помощью микроскопа. Подложки с собранными масками устанавливают на карусель вакуумной камеры.

Нанесение слоев элементов резистивно-емкостной микросхемы в непрерывном вакуумном цикле. Технологический процесс нанесения слоев тонкопленочных элементов в непрерывном вакуумном цикле осуществляется на установке, рабочая камера которой оборудована несколькими позициями испарения. На каждую из этих позиций устанавливается испаритель какого-либо материала, а над ним – маска соответствующего слоя микросхемы. Смена подложек относительно масок производится механическим устройством совмещения, а загрузка испарителей навесками испаряемых материалов – специальными манипуляторами.

Рассмотрим технологический процесс нанесения слоев тонкопленочной микросхемы на такой установке, полагая для конкретности, что в качестве резистивного слоя служит пленка хрома, коммутационными проводниками и обкладками конденсатора – пленки алюминия, диэлектриком – пленка монооксида германия, а защитным слоем контакт-

ных площадок – пленка никеля. На рис. 24 приведен технологический маршрут изготовления тонкопленочной платы МСБ методом свободных масок при непрерывном вакуумном цикле.

Перед началом процесса осаждения слоев тонкопленочной микросхемы стенки рабочей камеры установки и внутрикамерные устройства обрабатывают. Затем камеру загружают навесками испаряемых материалов: на первой позиции – из хрома, на второй позиции – из алюминия, на третьей – из монооксида германия (GeO), на четвертой – из алюминия и на пятой – из никеля. После этого в специальные гнезда устройства совмещения устанавливают подложки, закрепленные на подложкодержателях, на карусель подложек, а ниже подложек непосредственно над позициями испарения устанавливают маски: над первой позицией – маску резистивного слоя, над второй – маску нижней обкладки и проводников, над третьей – маску диэлектрика, над четвертой – маску верхней обкладки и проводников, над пятой – маску защитного слоя контактов.

По окончании загрузки камеру закрывают и откачивают до давления $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па. При этом давлении включают электронагреватель и нагревают подложки до температуры 250 °С для хрома, а для алюминия – 110 °С.

После того как подложки нагреваются, одну из них устанавливают над первой позицией испарения и совмещают с маской резистивного слоя, а на испаритель хрома подают напряжение. Следует отметить, что при напылении алюминия ток через испаритель начинают плавно увеличивать. При температуре плавления алюминий не испаряется, поскольку на его поверхности образуется тонкая, но прочная пленка окисла Al_2O_3 , препятствующая испарению. Поэтому силу тока, проходящего через испаритель, продолжают увеличивать до тех пор, пока металл не нагреется до температуры желтого каления (~1 000 °С). Ток увеличивают медленно и плавно, так как пленка окисла под действием резкого нагрева может внезапно разрушиться и произойдет разбрызгивание металла. Как только алюминий начнет испаряться, ток уменьшают на 10...15 %, открывают заслонку и производят осаждение металла

на подложку. Толщину пленки обычно контролируют по времени испарения, которое определяется технологом экспериментально. По истечении установленного времени заслонку закрывают. Затем этот процесс повторяют, совмещая по очереди все остальные подложки с маской нижней обкладки конденсатора.

Далее, одну из подложек переводят на третью позицию и совмещают с маской диэлектрика конденсатора. Затем включают питание испарителя, плавно увеличивают ток до рабочего значения и, выдержав испаритель при этом токе полминуты, открывают заслонку. Толщину осаждаемого слоя контролируют по специальному прибору или «свидетелю». Когда слой диэлектрика достигнет нужной толщины, закрывают заслонку. В дальнейшем осаждение монооксида германия производят на все остальные подложки, последовательно совмещая их с маской для диэлектрика.

Для получения верхней обкладки тонкопленочного конденсатора через соответствующую маску наносят алюминий, меняя подложки на четвертой позиции. По окончании процесса осаждения верхней обкладки на все подложки одну из них переводят на последнюю позицию, где установлены испаритель никеля и маска защитного слоя.

При использовании в качестве диэлектрика конденсатора монооксида кремния его испарение обычно производят из тигельного испарителя. Процесс осаждения монооксида кремния начинают также с плавного увеличения тока испарителя. Но так как монооксид кремния хорошо адсорбирует газы, то при нагревании эти газы начинают интенсивно выделяться в объем рабочей камеры и вакуум резко ухудшается. Поэтому навеску монооксида кремния отжигают при рабочем токе через испаритель до тех пор, пока вакуум не восстановится до первоначального значения.

По окончании процесса осаждения всех слоев на все подложки снимают ток испарителя никеля до нуля, выключают электронагреватель и, остудив подложки до температуры 60 °С, открывают рабочую камеру. Затем извлекают подложки из камеры и передают на контрольную операцию.

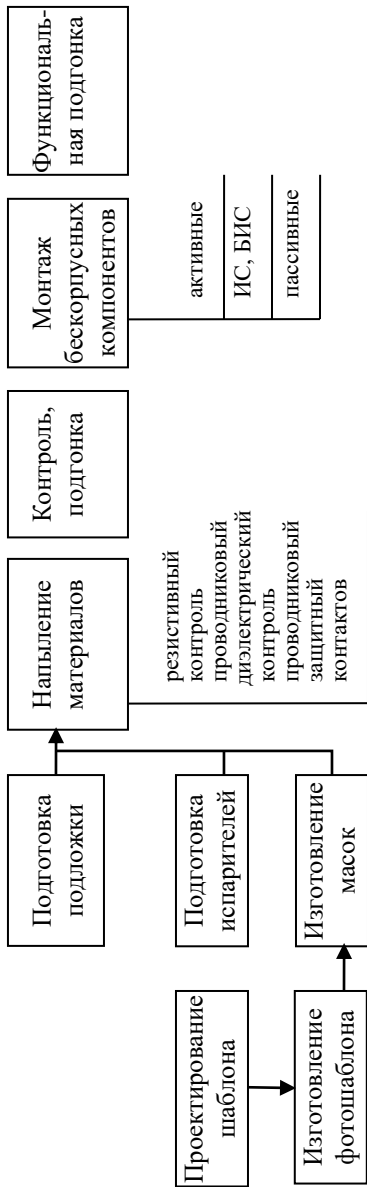


Рис. 24. Технологический маршрут производства тонкопленочных плат МСБ методом свободных масок при непрерывном вакуумном цикле

2.5. Основные типы вакуумных установок и линий

При организации серийного или массового производства изделий всегда стоит задача сокращения доли вспомогательного времени, приходящегося на одно изделие.

Применительно к процессам термического вакуумного напыления, катодного распыления и другим процессам, связанным с обработкой микросхем в вакууме, вспомогательное время (помимо установки и снятия подложек) включает в себя время на откачку системы до рабочего вакуума.

Для получения рабочего вакуума порядка $10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$ Па затрачивается время до 1,5–2 ч (даже при разогретом диффузионном насосе). Так как время напыления отдельного слоя редко превышает 1–1,5 мин, понятно стремление использовать многопозиционные вакуумные установки (МПВУ), позволяющие, не нарушая вакуума (за один вакуумный цикл), последовательно или одновременно обрабатывать несколько подложек. Эффект становится еще более значительным, если при этом применяют групповые подложки. Обычно используют групповые ситалловые подложки стандартного размера $60 \times 48 \times 0,6$ мм.

По степени непрерывности процесса обработки МПВУ могут быть разделены на 2 группы:

- 1) однокамерные МПВУ периодического действия;
- 2) многокамерные МПВУ полунепрерывного или непрерывного действия.

Установки первой группы работают по следующему циклу: установка подложек – откачка рабочего объема – обработка (напыление) – снятие вакуума и вскрытие – снятие обработанных подложек. Для таких установок характерны два момента: 1) вспомогательное время на откачку не перекрывается основным технологическим временем; 2) установка подложек и их совмещение с масками выполняется вручную (непосредственно или через соответствующие механизмы).

В установках второй группы откачка частично (МПВУ полуперерывного действия) или полностью (МПВУ непрерывного действия) совмещается с основным процессом обработки. Это достигается с помощью многокамерной системы с различным уровнем вакуума в отдельных камерах. В подобных установках целесообразно выполнять полный цикл изготовления микросхемы, т. е. напылять все слои, поэтому в обработке одновременно (на разных стадиях) находится несколько подложек. Управление в таких установках (транспортировка подложек и установка их в рабочие позиции) осуществляется автоматически. Таким образом, установки второй группы представляют собой автоматические линии.

Однокамерные МПВУ периодического действия. Однокамерная установка периодического действия имеет подколпачное многопозиционное устройство карусельного типа, которое выполняют в одном из двух вариантов: 1) в каждой позиции карусели устанавливают подложку в комплекте с накладной маской; 2) на карусели устанавливают только подложки, а маски размещают в неподвижном многопозиционном диске и, таким образом, подложка, переходя из позиции в позицию, последовательно совмещается с различными масками.

В установках первого типа обычно имеется одна рабочая позиция (позиция напыления), и поэтому в каждый момент времени обрабатывается лишь одна подложка.

К установкам этого типа относится установка УВН-2М-2 или УВН-71Р-2, упрощенная схема подколпачного устройства которой представлена на рис. 25. В данном случае карусель подложек и масок имеет 8 позиций и может непрерывно вращаться со скоростью 40–150 об/мин. Это обеспечивает идентичность свойств пленки на всех подложках. На базовой плите смонтирована 5-позиционная карусель резистивных испарителей таким образом, что питание подается только на тот испаритель, который выведен на рабочую позицию.

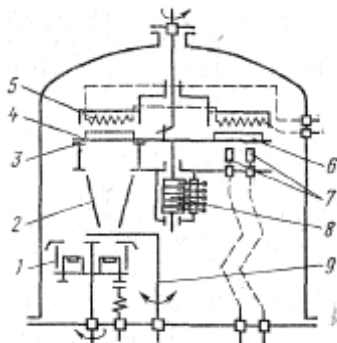


Рис. 25. Схема подколпачного устройства установки УВН-2М-2:
 1 – карусель испарителей; 2 – экраны; 3 – диафрагма; 4 – карусель масок и подложек; 5 – нагреватель подложек; 6 – имитатор с датчиками температуры и сопротивления пленки; 7 – электроды ионной очистки;
 8 – коллектор; 9 – заслонка

Технологические возможности такой установки в основном заключаются в следующем:

- 1) напыление элементов одного слоя через маску;
- 2) напыление двух сплошных слоев (например, резистивного и проводящего) без применения накладных масок с последующей двукратной фотолитографией.

Подколпачное устройство включает в себя систему ионной очистки, установленную неподвижно в одной из позиций, систему нагрева подложек, датчики контроля сопротивления и толщины наносимой пленки. С увеличением числа позиций сокращается доля вспомогательного времени откачки, приходящегося на одну подложку.

В установках второго типа имеется несколько рабочих позиций, в каждой из которых стационарно смонтирован испаритель и соответствующая маска. Подложки размещаются на карусельном устройстве. Переводя подложки из позиции в позицию и осуществляя совмещение их с неподвижными масками, можно последовательно сформировать элементы всех слоев, т. е. выполнить полный цикл напыления микросхем. Обработка выполняется од-

новременно (на разных стадиях) во всех позициях. Очередная индексация карусели (смена позиций) осуществляется после завершения наиболее длительного технологического перехода, т. е. имеет место сокращение основного технологического времени, приходящегося на одну подложку.

Примером установки данного типа является установка УВН-2М-1, схема подколпачного устройства которой изображена на рис. 26, а технические характеристики приведены в табл. 13. Подложки располагаются на 6-позиционной карусели, маски – на 6-позиционном неподвижном диске. На базовой плите равномерно по окружности размещены неподвижно 6 испарителей: 5 резистивных и 1 электронно-лучевой (для испарения тугоплавких материалов). Позиции испарения взаимно защищены экранами. Привод поворота карусели вначале приподнимает ее, выводя фиксирующие штифты из базовых отверстий, затем поворачивает на 60° и опускает на диск с масками. При этом штифты вновь входят в отверстия, а маски, имеющие плавающую конструкцию, плотно прижимаются к подложкам.

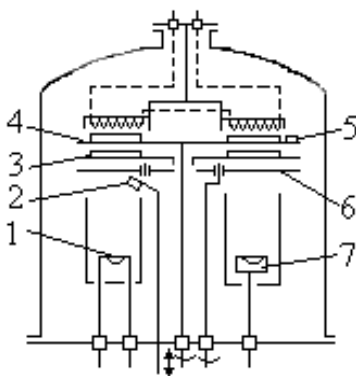


Рис. 26. Схема подколпачного устройства установки УВН-2М-1:
1 – резистивный испаритель; 2 – датчик контроля толщины пленки;
3 – диск с масками; 4 – карусель подложек; 5 – датчик контроля
сопротивления пленки; 6 – заслонка, 7 – электронно-лучевой испаритель

Таблица 13. Основные технические характеристики установки УВН-2М-1

Параметр	Значение
Предельный вакуум в рабочей камере	$5 \cdot 10^{-5}$ Па
Время достижения предельного вакуума при разогретом паромасляном насосе	90 мин
Быстрота откачки: – высоковакуумного насоса Н-2Т – низковакуумного насоса ВН-7Г	1 500 л/с 7 л/с
Размеры рабочей камеры	$\varnothing 500 \times 640$ мм
Максимальная температура нагрева рабочей камеры	90° С
Питание резистивных испарителей: – максимальный ток – напряжение (ступени регулировки)	500А (5 шт.); 50А (1 шт.) 4, 8, 16, 32 В
Питание электронно-лучевого испарителя (ЭЛИ): – максимальный ток – максимальное напряжение	200 мА 5 кВ
Размеры подложек	$60 \times 48 \times 0,6$ мм
Допустимая температура нагрева подложек	400 °С
Точность совмещения подложки с маской при температуре 300 °С, мкм	100
Максимальная потребляемая мощность	9 кВт
Расход холодной воды от магистрали с давлением 2–4 ат	400 л/ч
Расход горячей воды от магистрали с давлением 2–4 ат	200 л/ч

Окончание табл. 13. Основные технические характеристики установки ВВН-2М-1

Параметр	Значение
Габариты:	
– установки с опущенным колпаком	1 550 × 1 050 × 1 800 мм
– установки с поднятым колпаком шкафа	1 550 × 1 050 × 2 450 мм
– управления ЭЛИ	500 × 600 × 1 750 мм
Масса:	
– установки	800 кг
– шкафа управления ЭЛИ	500 кг

Многокамерные МПВУ. Для частичного перекрытия времени откачки основным технологическим временем необходима «шлюзовая» многокамерная система, в которой подложки в кассетах-спутниках автоматически перемещаются из камер с относительно низким вакуумом (загрузочная камера, транспортная камера) в рабочие камеры с высоким вакуумом. При этом между двумя смежными камерами должна устойчиво поддерживаться определенная разность давлений (на 2–3 порядка) и в то же время подложка в кассете должна свободно попадать из одной камеры в другую, смежную с ней.

Реальные многокамерные установки имеют в качестве каналов сообщения между камерами достаточно длинные прямоугольного сечения окна, в которые входят массивные кассеты прямоугольного сечения с определенным рассчитанным зазором. Длина канала всегда должна превышать размер подложки, несколько утопленной в кассете, чтобы вводимый в высоковакуумную камеру объем воздуха над подложкой полностью отсекался кассетой от обеих камер.

На рис. 27 дана упрощенная схема автоматической линии полунепрерывного действия (вид в плане). Линия состоит из 9

рабочих камер (РК₁ – РК₉) и 5 вспомогательных: загрузочной (ВК₁), разгрузочной (ВК₂), двух транспортных (ВК₃ и ВК₄) и выравнивателя (ВК₅), являющегося одновременно и транспортной камерой. Каждая камера снабжена индивидуальной системой откачки, обеспечивающей постоянное давление, указанное на схеме.

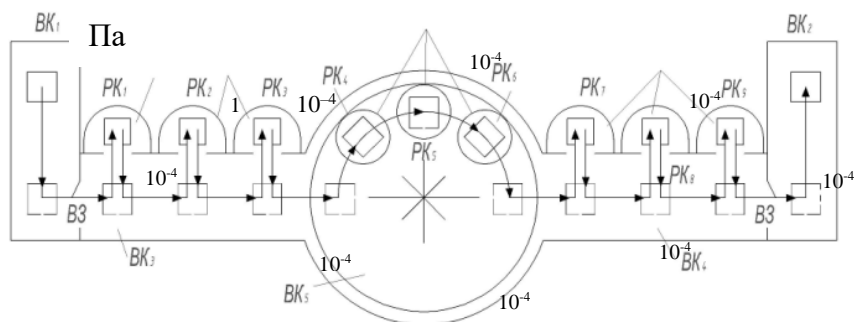


Рис. 27. Упрощенная схема автоматической линии полунепрерывного действия
 Сплошными линиями показаны кассеты в стопках и в позициях напыления,
 пунктирными линиями – в промежуточных (не рабочих) положениях

Подложки в кассетах-спутниках установлены стопкой до 40 штук в камере ВК₁. Вся стопка поджимается вверх к базовым элементам так, что верхняя кассета всегда находится в определенном исходном положении. Грейферный механизм подачи, размещенный в транспортной камере ВК₃, через окно вакуумного затвора ВЗ захватывает верхнюю кассету и выводит ее в исходную позицию перед камерой РК₁. Одновременно меняют свои исходные позиции другие три кассеты, введенные ранее, причем последняя попадает в выравниватель. Поперечным ходом толкателей кассеты вводятся в соответствующие рабочие камеры РК₁ РК₂ и РК₃ (камера РК₁ предназначена для ионной очистки подложек), а карусель

выравнивателя поворачивается на $\frac{1}{8}$ часть, вводя соответствующую кассету в камеру РК₄. По завершении обработки во всех рабочих камерах толкатели возвращают кассеты в исходные позиции, а грейферный механизм повторяет уже указанные движения, совершая новый такт.

Правое крыло линии работает аналогично, и разница лишь в том, что грейферный механизм принимает кассеты с выравнивателя, а последнюю кассету передает в разгрузочную камеру ВК₂, где происходит сборка их в стопку.

Выравниватель, содержащий 3 позиции напыления (камеры РК₄, РК₅ и РК₆), служит для расчленения особо длительного перехода (например, напыления относительно толстых пленок с малой скоростью) на два или три этапа и сокращения таким образом длительности такта работы линии.

Для выполнения загрузки и выгрузки используют вакуумные затворы ВЗ, которые временно отсекают объем камеры ВК₃ или ВК₄ от общей системы. После загрузки (выгрузки) камера герметизируется, производится откачка до давления 10^{-2} Па и вакуумный затвор открывается. В процессе выполнения этих вспомогательных приемов продолжается обработка подложек, ранее введенных в установку, т. е. вспомогательное время частично перекрывается основным технологическим временем.

В данной линии применяют позиционную систему автоматического управления, т. е. очередной такт начинается только после срабатывания всех концевых выключателей (на схеме не показаны), что свидетельствует о полном завершении предыдущего такта.

Напылительная линия непрерывного действия. На рис. 28 показана схема напылительной линии непрерывного действия, предназначенной для производства пассивных тонкопленочных элементов. Для непрерывной загрузки подложек используются вакуумные шлюзовые камеры; подложки в них подаются с помощью специального транспортирующего механизма.

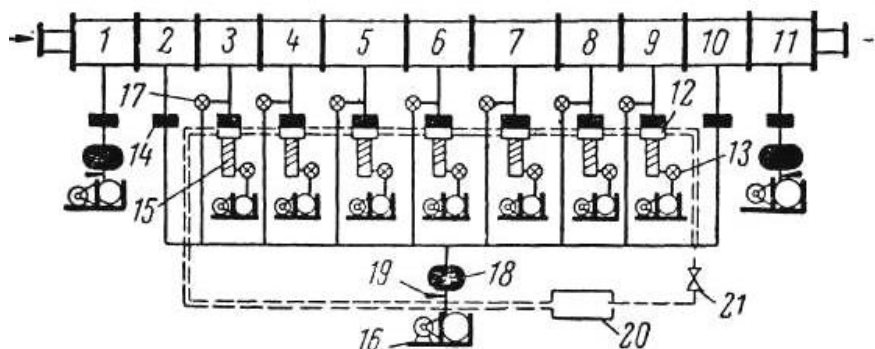


Рис. 28. Схема напылительной линии для производства резисторов:

1–3 – входные шлюзовые камеры; 4–8 – рабочие камеры; 9–11 – выходные шлюзовые камеры; 12 – заслонки; 13 – кран форвакуумного насоса;

14 – краны предварительной откачки; 15 – паромасляный насос;

16 – механический насос; 17 – высоковакуумный кран; 18 – механический бустерный насос; 19 – клапан давления; 20 – холодильник;

21 – расширительный клапан

Линия состоит из 11 камер. Назначение камер следующее: 1 – понижение давления от атмосферного до 300 Па; 2 – понижение давления до $4 \cdot 10^{-1}$ Па; 3 – понижение давления до 10^{-4} Па, прогрев подложек; 4 – прогрев подложек; 5 – напыление танталовых резисторов в атмосфере аргона при давлении 3 Па; 6 – понижение давления до 10^{-4} Па; 7 – напыление проводников из золота при давлении 10^{-4} Па; 8–11 – постепенный подъем давления до атмосферного и понижение температуры подложек до комнатной.

Первые четыре камеры оборудованы кварцевыми лампами. Специальные рефлекторы облучают инфракрасными лучами проходящие под ними стеклянные или керамические подложки. Благодаря облучению и нагреву с подложек удаляются сорбированные газы и другие поверхностные загрязнения. Получающаяся химически чистая поверхность обеспечивает хорошую адгезию и чистоту пленок.

Откачка каждой высоковакуумной камеры осуществляется индивидуальной вакуумной системой, состоящей из механического насоса, паромасляного насоса, охлаждаемой фреоном ловушки и высоковакуумного вентиля. Охлаждение всех ловушек осуществляется от одной холодильной машины путем пропускания холодного фреона последовательно через все ловушки. При запуске линии первоначальная откачка камер производится через вакуум-провод предварительной откачки.

Перед помещением в транспортирующее устройство подложки закрепляются в специальные держатели, которые одновременно являются ползунами.

На рис. 29 показана конвейерная линия, предназначенная для производства многослойных тонкопленочных микросхем. Она состоит из восьми горизонтально расположенных цилиндрических камер, смонтированных на едином фундаменте. Камеры при помощи боковых патрубков вакуумно-плотно соединены друг с другом и связаны одним общим цепным конвейером, проходящим в вакуумном объеме через все камеры напылительной линии.

В магазине первой камеры перемещаются 25 ситалловых подложек размером 60×48 мм. Подложки, подлежащие напылению, перед загрузкой в магазин закрепляются в специальные рамко-подложкодержатели. Цепной конвейер захватывает рамки из магазина и транспортирует их на позиции напыления, где они фиксируются специальным зажимным механизмом.

В первой камере также осуществляется предварительная очистка подложек при помощи высокотемпературного прогрева. Нагрев осуществляется спиральными нагревателями, расположенными по боковым стенкам магазина.

Во второй камере производится окончательная очистка подложек методом электронной бомбардировки.

Пять камер (с III по VII) являются рабочими, в них осуществляется напыление различных материалов. В последней камере напыленные подложки собираются в магазин.

Во всех камерах линии поддерживается рабочий вакуум около 10^{-4} Па. Откачка линии осуществляется четырьмя паромасляными насосами с быстротой действия каждого насоса 4 000 л/сек (один насос на две камеры) и двумя механическими насосами с быстротой действия каждого насоса 3 л/сек, причем один механический насос работает на два паромасляных насоса. Каждый паромасляный насос имеет две ловушки. Нижняя ловушка, расположенная непосредственно над горловиной насоса, имеет водяное охлаждение, верхняя ловушка охлаждается фреоном. При этом каждая ловушка охлаждается при помощи индивидуальной двухступенчатой холодильной машины.

Все вводы в камеру осуществляются с передней стороны линии через объем с промежуточной откачкой. Уплотнение вводов между атмосферой и промежуточным вакуумом осуществляется с помощью резины. Из промежуточного объема вводы проходят в камеру без уплотнений через диффузионные зазоры. Откачка промежуточных объемов осуществляется через общий вакуум-провод (коллектор) при помощи паромасляного насоса с быстротой действия 750 л/сек и механического насоса с быстротой действия 20_x л/сек.

Вакуум в рабочем объеме линии измеряется двумя ионизационными вакуумметрами, установленными на камерах 3 и 6. Вакуум в трубопроводе промежуточной откачки измеряется при помощи магнитного электроразрядного манометра. На форвакуумных магистралях установлены термпарные вакуумметрические лампы. В каждой камере имеется карусель из пяти масок. Карусель, кроме вращения, имеет возможность продольного и поперечного перемещения. Юстировка при совмещении осуществляется вручную при помощи оптических приборов и достигает точности 50 мкм. Испарители закрепляются на специальных кронштейнах. Во всех напылительных камерах имеются нагреватели, обеспечивающие возможность прогрева подложек до 400 °С. Регулирование температуры осуществляется при помощи специального трансформатора с ручным управлением. В каждой напылительной камере также имеется холодильник, заполняемый жидким азотом, что дает возможность при необходимости производить быстрое охлаждение подложки.

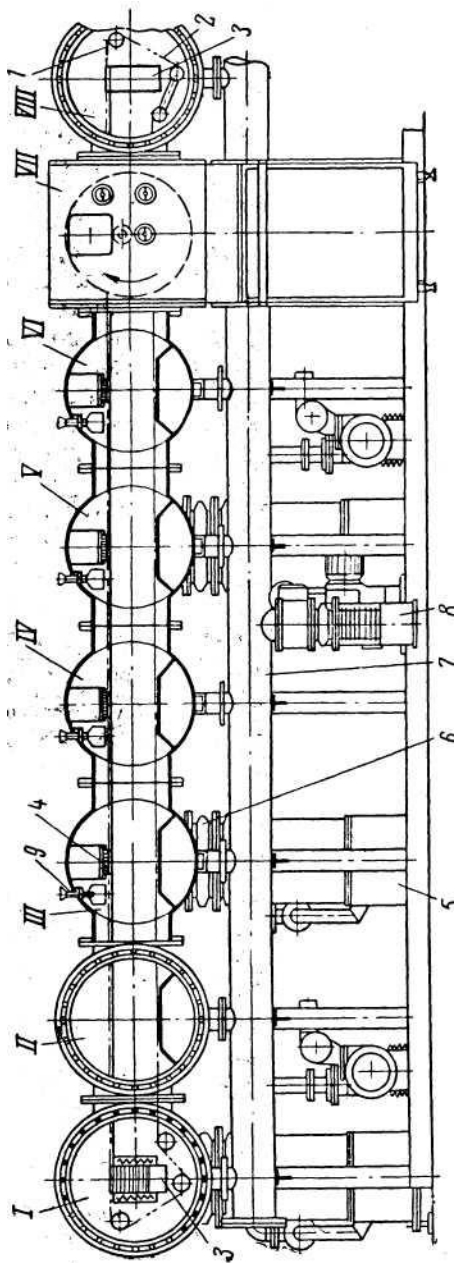


Рис. 29. Восьмикамерная конвейерная линия непрерывного действия:

- I-VIII – рабочие камеры установок; 1 – цепной конвейер; 2 – привод конвейера; 3 – магазины;
 4 – нагреватель; 5 – паромасляный насос (4 000 л/сек); 6 – ловушка; 7 – вакуум-провод промежуточной откачки;
 8 – паромасляный насос (750 л/сек); 9 – холодильник

В заключение отметим, что важной задачей при проектировании МПВУ (и особенно автоматических линий) является обеспечение испарителей достаточным количеством напыляемого материала.

Основными техническими решениями этой задачи могут быть следующие:

- 1) несколько стационарных резистивных испарителей с последовательным их использованием;
- 2) карусель сменных резистивных испарителей с последовательным их использованием;
- 3) резистивный испаритель с периодической загрузкой его дозированных навесками без нарушения вакуума (загрузка может быть механизирована или автоматизирована);
- 4) электроннолучевой испаритель с материалом в виде массивного образца;
- 5) катодное распыление с поверхности массивного катода.

2.6. Измерение и контроль параметров тонких пленок

Измерение скорости напыления и толщины пленки в процессе конденсации. Для получения высококачественных пленок с заранее заданными и воспроизводимыми параметрами необходимо строго контролировать процесс осаждения пленок. Вопросы обеспечения точности изготовления параметров элементов (R , C и L) можно разделить на два отдельных этапа:

I – путем контроля параметров пленки в процессе ее осаждения;

II – путем доводки величины элементарных параметров после изготовления пленок.

На первом этапе используется групповой метод контроля (одновременно выполняется для всех элементов, выполняемых на данной подгонке).

На втором этапе используется как групповой, так и индивидуальный метод подгонки.

Для технологии ГИС частного применения и МСБ особенно характерна и целесообразна функциональная подгонка, когда при подгонке одного или нескольких элементов выходное напряжение (электрические параметры) обеспечивается в поле допуска.

В процессе производства тонкопленочных плат контролируются как резисторы, так и конденсаторы. Для контроля их номиналов разработаны специальные приборы и методы («свидетели»).

К приборам, предназначенным для автоматического контроля и регулирования скорости осаждения и толщины пленки в процессе ее конденсации, предъявляется ряд требований:

- минимальная погрешность при измерении как скорости осаждения, так и толщины пленки (не более нескольких процентов);

- малая инерционность, высокая надежность, стабильность во времени и независимость показаний от условий работы (температуры, давления, механических воздействий, агрессивных паров и др.);

- одновременное измерение как скорости осаждения, так и толщины пленки с постоянством чувствительности в широком диапазоне измеряемых величин;

- пригодность для измерения металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок, получаемых с помощью как резистивного, так и электронно-лучевого нагрева.

На практике (в процессе осаждения) встречаются:

- различный химический состав осаждаемых материалов;
- различные способы для нагрева и испарения;
- широкие диапазоны требуемой скорости осаждения и толщины тонкопленочных слоев.

Все это вызывает необходимость использования методов измерения, основанных на различных физических принципах. Суще-

ствующие приборы для измерения скорости осаждения и толщины тонких пленок можно разделить на две основные группы:

– первые дают информацию о массе наносимой пленки или ее толщине;

– вторые – о скорости осаждения материала.

В первом случае значение скорости осаждения можно найти путем дифференцирования сигнала, пропорционального изменению толщины осаждаемой пленки. Во втором случае значение толщины пленки можно найти интегрированием сигнала, пропорционального скорости осаждения. На рис. 30 приведена классификация приборов измерения толщины и скорости осаждения тонких пленок.

В отечественной практике производства тонкопленочных элементов микросхем наибольшее распространение получили приборы, основанные на использовании ионизационного, радиочастотного, емкостного и резистивного методов.

Ионизационный метод. В основе метода лежит принцип ионизации потока пара испаряемого вещества электронами, эмитируемыми накалившимся катодом. При этом измеряется величина ионного тока, которая пропорциональна плотности пара вещества, проходящего через рабочий объем датчика.

Прямой замер величины ионного тока приводит к большой погрешности, так как в пространстве, где происходит ионизация молекул испаряемого вещества, одновременно ионизируются и молекулы остаточных газов. При этом получаем сумму ионных токов: $\Gamma_{\text{газ}}^+ + \Gamma_{\text{вещ}}^+ = \Gamma^+$. Для уменьшения погрешности измерения, то есть исключения ионного тока остаточного газа, применяют различные варианты.

Вариант 1. На пути молекулярного потока вещества устанавливают экран, с помощью которого (закрывая и открывая) модулируют поток испаряемого вещества и выделяют этот переменный ток. На этом принципе построены приборы ИСТИ-1 и ИСТИ-2 (табл. 14).

Для определения толщины пленки производится интегрирование по времени величины переменной составляющей ионного тока:

$$h = \frac{1}{D_0} \int_0^t I^+(t) \cdot dt ,$$

где D_0 – постоянная, зависящая от геометрии датчика, его расположения по отношению к испарителю и от эффективного сечения ионизации.

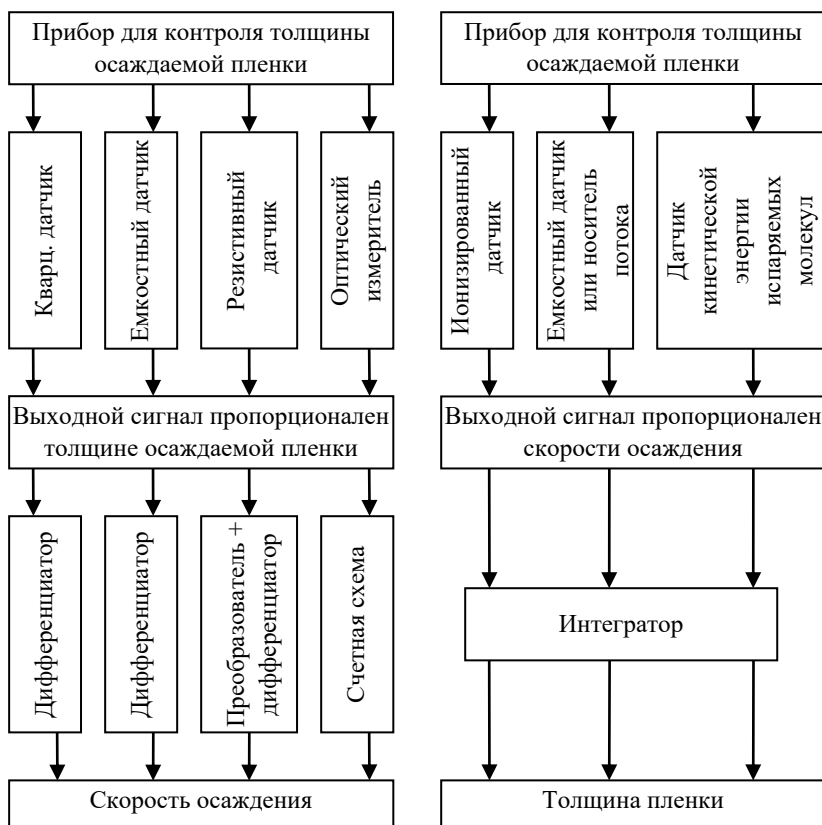


Рис. 30. Классификация приборов измерения толщины и скорости осаждения тонкой пленки

Поскольку эффективное сечение ионизации различно для различных веществ, то прибор приходится предварительно градуировать по каждому материалу.

Прибор ИСТИ-1 может быть использован для автоматического регулирования скорости осаждения.

Таблица 14. Технические характеристики приборов

Параметры	ИСТИ-1	ИСТИ-2
1. Диапазон измеряемой скорости осаждения, А°/сек (по висмуту)	20–200	10–100
2. Максимальная относительная погрешность скоростиосаждения, %	±10	±10
3. Диапазон измерения толщин, А° (по висмуту)	1 000–10 000	1 000–10 000
4. Макс. относительная погрешность измерения толщины, %	±8	±8
5. Суммарная толщина пленки, наносимая на один датчик, мкм	100	100
6. Тип испарителя	Резистивный	Резистивный и электронный

Вариант 2. Кроме механической модуляции потока пара испаряемого материала, широкое применение находит разностный метод. При этом методе используются два идентичных датчика, один из которых находится в потоке пара вещества, а другой – вне его. Полезный сигнал в этом случае определяется разностью ионных токов.

На основе этого метода серийно выпускается прибор КСТ-1. Он может работать в системах, использующих как резистивные, так и электроннолучевые испарители. Погрешность измерения толщины пленки составляет $\pm 5\%$.

Радиочастотный метод (метод кварцевого вибратора).

Этот метод основан на измерении изменения частоты механических колебаний кварцевого кристалла при осаждении на нем пленки испаряемого вещества.

Толщина пленки определяется из соотношения

$$h = \frac{m_0}{f_0 F} \cdot \frac{1}{\gamma} \Delta f,$$

где m_0 – масса кварцевого кристалла; f_0 – резонансная частота кварца; F – площадь кварцевого кристалла, покрытая пленкой испаряемого вещества; γ – плотность осажденной пленки; Δf – изменение разностей частоты.

Поскольку $f_0 \gg \Delta f$, а F и $\gamma = \text{const}$, то $h = \varphi(\Delta f)$ – графически выражается прямой линией, выходящей из начала координат. Выбор рабочей частоты (кварцевого резонатора) зависит от диапазона толщин измеряемых пленок.

Если требуется измерять очень малые толщины пленок и необходим прибор с высокой чувствительностью, то выбирают высокую рабочую частоту. Если же требуется прибор с достаточно большим диапазоном измеряемых толщин, обладающий большой областью линейной зависимости изменения частоты от толщины напыляемой пленки, – выбирают относительно низкую рабочую

частоту. Отечественной промышленностью выпускается два типа приборов: КИТ-1 и КИТ-2 (табл. 15).

Датчиками приборов КИТ-1 и КИТ-2 служат серийно-выпускаемые кварцевые вибраторы с частотой колебаний 3,3 МГц и 9,99 МГц.

С целью многократного использования кварцевого вибратора на его поверхность предварительно осаждается слой алюминия. После использования вибратора этот слой вместе с осевшей на него пленкой различных испаряемых веществ легко смывается 10-процентным раствором NaOH.

Достоинства приборов: сравнительно высокая точность измерения, высокая чувствительность, малая инерционность.

Этот метод позволяет контролировать тонкие пленки вплоть до молекулярных слоев при скорости роста до 10^5 мкм/сек с выдачей информации в виде аналоговых или цифровых сигналов.

Таблица 15. Характеристики приборов

Параметры	КИТ-1	КИТ-2
1. Рабочая частота, кГц	3 300	9 990
2. Чувствительность по толщине (по серебру), Гц/А°	2,5	2,6
3. Максимальный сдвиг частоты, Гц	50	600
4. Минимально измеряемое изменение массы, Г/см ²	4×10^{-7}	$8,8 \times 10^{-8}$
5. Суммарная толщина пленки SiO на датчик, А°	222 000	292 000
6. Точность измерения сдвига частоты от верхнего предела, %	±3	±2,5

Кварцевый вибратор имеет малые размеры, прост по конструкции, надежен в работе и удобен в эксплуатации. Этот метод обеспечивает непрерывный контроль и управление ростом пленок практически для всех веществ. Позволяет использовать ЭВМ и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП).

К недостаткам следует отнести: необходимость в периодической чистке кварцевого вибратора; паразитный уход частоты, вызванный нестабильностью кристалла из-за близости нагретых до высокой температуры испарителей и подложек. Для исключения этого ухода частоты датчик охлаждают проточной водой (20 °С), что обеспечивает малое изменение частоты при изменении температуры.

Уход частоты может быть обусловлен также неточным исполнением среза кристалла и паразитными колебаниями за счет плохого закрепления кристалла.

Емкостный метод. Для контроля величины емкости конденсатора в процессе напыления используется датчик («свидетель»), представляющий собой подложку с гребенчатым конденсатором (рис. 31).

В основу этого метода положено изменение малых (от десятых до единиц процентов) приращений емкости плоского гребенчатого конденсатора при осаждении на него пленки диэлектрика.

При напылении диэлектрической пленки на поверхность конденсатора его емкость возрастает вследствие изменения диэлектрической проницаемости:

$$C = C_0 + \Delta C; \Delta C = f(\varepsilon, h),$$

где h – толщина, ε – относительная диэлектрическая проницаемость.

При малых толщинах диэлектрических пленок (в пределах тысячных долей миллиметра) изменение емкости ΔC в зависимости от толщины диэлектрика практически имеет линейный характер. Измерение приращений емкости производится с помощью измерительного моста.

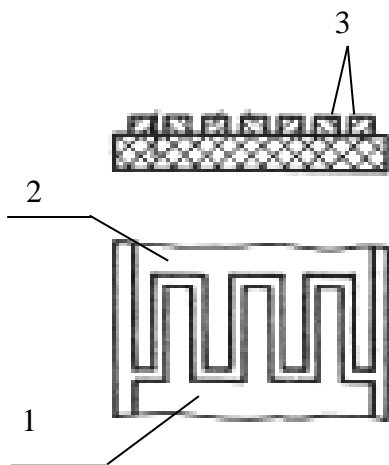


Рис. 31. Емкостный датчик
1, 2 – электроды; 3 – обкладки

Недостатки метода:

- точность измерения зависит от свойств диэлектрической пленки, от параметров процесса осаждения, от температурной стабильности самого эталонного конденсатора;
- необходимость калибровки прибора по каждому осаждаемому материалу;
- необходимость периодической очистки конденсатора от сконцентрировавшейся на его поверхности пленки.

Резистивный метод. В основе метода лежит зависимость между толщиной пленки металла или сплава и величиной ее электрического сопротивления постоянному току.

Для измерения электрического сопротивления пленки в процессе осаждения в непосредственной близости от подложки устанавливается «свидетель» из материала той же подложки в виде квадратной пластины. На краях пластины имеются широкие плоские контакты из серебра, которые соединены с измерительным мостом.

Толщина пленки вычисляется по формуле $h = \rho L / R_s b$, где ρ – удельное сопротивление, L и b – соответственно длина и ширина пленки, R_s – сопротивление квадрата пленки.

Подгонка элементов после изготовления тонкопленочной платы

Несмотря на контроль параметров элементов в процессе изготовления тонкопленочной платы, при повышенных требованиях точность их не соответствует требуемым номиналам, что приводит к введению в технологический процесс операции подгонки. Целесообразно проводить операцию подгонки после завершения изготовления комплексов. Это делается для того, чтобы скомпенсировать отклонения предыдущих операций.

Необходимость подгоночных операций после изготовления комплексов пленочных элементов микросборок обусловлена следующими их особенностями:

- повышенной точностью многих параметров специализированных ГИС и МСБ;
- сравнительно небольшими партиями изделий, что оправдывает дополнительные затраты на выполнение подгоночных операций.

Кроме того, подгонка необходима при использовании полуфабрикатов подложек с комплексами пленочных элементов типовых схем, которые требуются для получения необходимой комплектации и конкретных значений параметров элементов.

В настоящее время подгонка является обычной даже в производствах ГИС общего применения. Например, вакуумное нанесение резистивной пленки с контролем по «свидетелю» или анодирование комплекса танталовых резисторов сопротивления, в сущности, является групповой подгоночной операцией.

Погрешность параметров пленочных элементов определяется погрешностями электрофизических свойств пленки (структуры),

ее толщины и контура элементов. Следовательно, в процессе подгонки логично использовать обратное воздействие на эти факторы. В зависимости от последовательности операций подгонки отдельных элементов подгонка может характеризоваться по временному фактору: групповая параллельная (когда одновременно изменяются параметры у всей группы элементов) и индивидуальная последовательная (если подгоняется каждый элемент). Кроме того, при подгонке может подвергаться воздействию или вся рабочая (резистивная) зона пленочного элемента (резистора), или ее часть. Следовательно, с пространственной точки зрения подгонка может быть: общая (всей рабочей зоны) или локальная (обрабатывается только часть этой зоны). На рис. 32 приведена структурная схема методов подгонки.

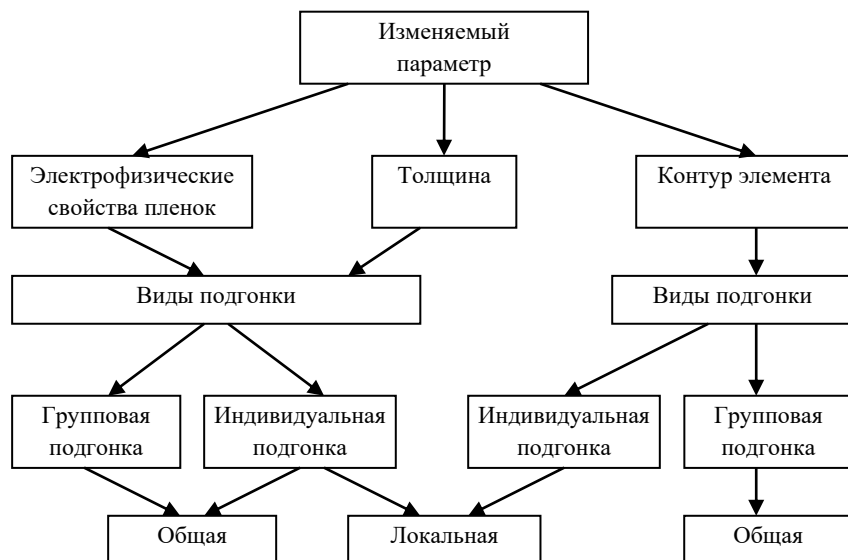


Рис. 32. Структурная схема методов подгонки

При любых видах подгонки основного параметра (сопротивление резистора, емкости конденсатора) следует учитывать сопутствующие воздействия на другие параметры элемента (ТКС, ТКЕ, ЭДС шумов, $\text{tg}\delta$ и так далее).

Особенностью большинства видов подгонок является одностороннее изменение параметра (для резистора – увеличение, а для конденсатора – уменьшение).

Способы групповой подгонки. Возможность групповой подгонки обусловлена сильной корреляционной связью сопротивлений пленочных резисторов, изготовленных на общей подложке. Отклонения режимов напыления резистивного слоя, травления и фотообработки от номинальных значений в среднем одинаково изменяют удельное поверхностное сопротивление и геометрию всех резисторов на групповой подложке. Возникающая при этом погрешность сопротивлений резисторов может быть скомпенсирована изменением удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки по всей площади подложки.

Способы групповой подгонки основаны на принципах упорядочения структуры резистивной пленки, окисления ее поверхности (уменьшение ее толщины), а также групповой коррекции контуров элементов. Однако групповые методы подгонки нельзя считать достаточно эффективными, так как они способны обеспечить точность сопротивления в лучшем случае единицы процентов.

Наиболее технологичным методом является термический отжиг в вакууме, в процессе которого резистивная пленка рекристаллизуется, уменьшается концентрация дефектов. При этом уменьшение величины сопротивления резистивной пленки сопровождается повышением ее временной стабильности.

Второе направление групповой подгонки основано на принципе изменения толщины резистивной пленки методами химического и анодного окисления или в среде кислорода. В этом случае сопротивление резисторов увеличивается ввиду образующегося

поверхностного слоя, имеющего достаточно большее сопротивление, чем сопротивление материала резистивной пленки.

Третьим способом групповой подгонки является групповая коррекция контуров элементов. Определенное отклонение параметров резистивной пленки на общей подложке можно скомпенсировать на последующих операциях изменением размеров фотошаблонов и масок.

Способы индивидуальной подгонки. Индивидуальную подгонку пленочного резистора выполняют следующими методами:

- термообработкой током, пропускаемым через резистор, а также лазерным лучом малой мощности;
- химическим и анодным окислением поверхности резистивной пленки;
- пескоструйной обработкой поверхности пленки;
- локальным изменением контура резистивной пленки элемента (электроискровым, лазерным и механическим методами, а также высокочастотной эрозией).

При термообработке током, пропускаемым через резистор, происходит его нагрев и возможно как окисление поверхностного слоя резистивной пленки (R_s увеличивается), так и улучшение ее структуры (R_s уменьшается). Только окисление поверхностного слоя пленки происходит, если резистор был предварительно термообработан в вакуумной камере. В случае отсутствия термообработки в вакууме и наличия защиты диэлектрическим слоем имеет место процесс структурных преобразований. Точность подгонки составляет ± 1 %. Термообработка резистивной пленки лазерным лучом осуществляется при малой мощности луча.

Индивидуальное химическое окисление резистивной пленки резистора аналогичен групповому окислению пленки, но травитель подается только на отдельный резистор (на его часть).

При анодном окислении поверхности резистивной пленки используют вязкий электролит. При этом происходит не только подгонка, но и защита окисным слоем. Недостатком метода является

наличие контактной площадки и ее удаление при окончании подгонки.

Пескоструйная обработка резистивной пленки показана на рис. 33.

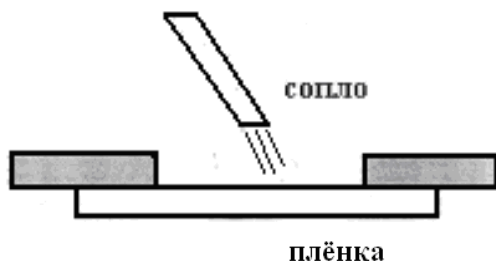


Рис. 33. Пескоструйная подгонка

С помощью микросопла на часть резистивной пленки подается сжатый воздух с абразивным порошком ($\varnothing 20$ мкм). Этот способ удобен для подгонки толсто пленочных резисторов. При подгонке вскрывается защитный слой резистора, что требует дополнительной операции защиты. Точность подгонки составляет 1 %. Качество подгонки зависит от точности регулировки потока частиц. На крупных предприятиях используют автоматические установки производительностью до 4 000 резисторов в час.

Для подгонки резисторов электроискровым методом используют импульсное напряжение, которое подается на один из выводов резистора и игольчатый электрод (рис. 34). При касании игольчатым электродом резистивной пленки происходит локальное испарение пленки (выжигание точечное). Последовательным перемещением иглы испаряется материал на следующем участке. При качественной игле и точном перемещении можно получить дорожки шириной до 50 мкм. Точность подгонки – до 1,1 %. Недостатки данного способа подгонки: сравнительно низкая производительность, быстрый износ иглы и значительная зависимость точности от качества реза.

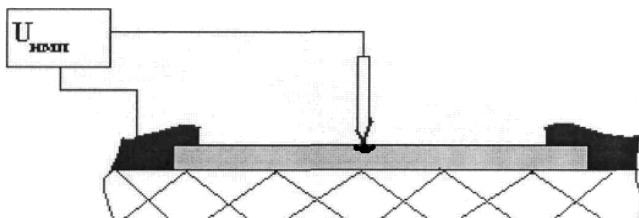


Рис. 34. Электроискровая подгонка



Рис. 35. Высокочастотная эрозия

Для высокочастотной эрозии используют высокочастотный генератор с частотой 28...30 МГц (рис. 35). Между резистивной пленкой и игольчатым электродом подводится напряжение с амплитудой порядка 40 В. При приближении электрода к поверхности резистора высокочастотное поле нагревает и испаряет материал пленки.

Для индивидуальной подгонки (изменения контура элемента) часто применяют лазерный способ, который обладает рядом преимуществ: малая инерционность процесса, высокая производительность, малый размер дорожек (разрешающая способность луча до 0,5 мкм), отсутствие химикатов, электролитов и абразивной пыли, возможность автоматизации технологического процесса и высокая точность ($\pm 0,1\%$). Для подгонки применяют в основном два вида лазеров: газовый (СОН) и твердотельный

(рубиновый). Для подгонки резисторов используют полуавтоматические и автоматические лазерные установки «Темп – 10» и «Темп – 30».

Механический способ изменения контура элемента заключается в удалении части резистивной пленки вращающимся алмазным бором. Недостатки – опасность появления микротрещин и сравнительно большие размеры бора.

Комбинированные способы подгонки. Для точных электрических цепей (например, RC) часто возникает необходимость в двусторонней подгонке. Такая подгонка параметров цепей осуществляется прежде всего изменением параметров разных элементов цепи. Например, увеличение величины сопротивления резистора увеличивает подгоняемый параметр всей цепи. В то же время уменьшение емкости конденсатора уменьшает этот параметр. Следовательно, применяя один и тот же технологический способ подгонки, можно многократно корректировать этот параметр в обе стороны.

В тех случаях, когда в двусторонней подгонке участвует один элемент (например, резистор), то здесь применяют последовательные способы подгонки.

Например, токовая подгонка (нагрев) уменьшает, а резка лазерным лучом увеличивает подгоняемый параметр.

Двусторонняя подгонка может быть выполнена изменением режима одного и того же процесса подгонки. Например, при обработке острым лучом лазера (резка, испарение) происходит увеличение сопротивления. А при малой мощности луча увеличивается его пятно и нагревается пленка. Здесь происходит улучшение структуры пленки и, соответственно, уменьшение сопротивления. Для двусторонней групповой подгонки можно использовать химический способ подгонки. В данном случае подгонка производится при периодической смене среды:

- окисляющая среда увеличивает сопротивление;
- восстанавливающая среда уменьшает сопротивление.

2.7. Организация производства тонкопленочных ГИС, БГИС и МСБ

Производство специализированных ГИС и БГИС и МСБ является в основном мелкосерийным. Рассмотрим организацию производства тонкопленочных плат способом термического испарения в вакууме или ионно-плазменным распылением. Для организации цеха необходимо: выбрать технологический процесс, который определяется требованиями к ГИС и БГИС, возможностями предприятия, наличием необходимого оборудования, отработанностью технологии и т. д.; разбить технологический процесс на отдельные операции с учетом особенностей выбранного оборудования, с учетом ориентировочного процента выхода годных микросхем и времени работы оборудования; определить количество основного и вспомогательного оборудования на всех операциях; определить структуру участка и необходимое количество обслуживающего персонала; обеспечить условия вакуумной гигиены в производственных помещениях.

На рис. 36 приведена примерная структура цеха производства тонкопленочных плат МСБ, а на рис. 37 – ориентировочная схема размещения помещений и рабочих мест на вакуумном участке с производительностью 5 000 подложек в месяц при двухсменной работе и использовании на каждой из пяти операций нанесения пленок одной установки, например типа УВН-71Р-2. На рис. 37 квадраты без цифр означают рабочие места операторов, рабочих и служащих; 1, 2, 3, 4, 5 – вакуумные установки для нанесения резистивных, проводящих, контактных, изолирующих, коммутирующих и защитных слоев микросхемы; 6, 7 – стенды и измерительные приборы для контроля параметров элементов после нанесения каждого слоя; 8 – юстировки масок; 9 – рабочее место ОТК; 10 – рабочее место для контроля готовых микросхем; 11, 12, 13, 14 – рабочие места соответственно для резки подложек, слесаря-механика, электромеханика, наладчика вакуумного оборудования; 15, 16, 17, 18 – рабочие места соответственно мастера первой сме-

ны, мастера второй смены, начальника и технолога участка; I, II, III – производственные помещения соответственно I, II, III классов.

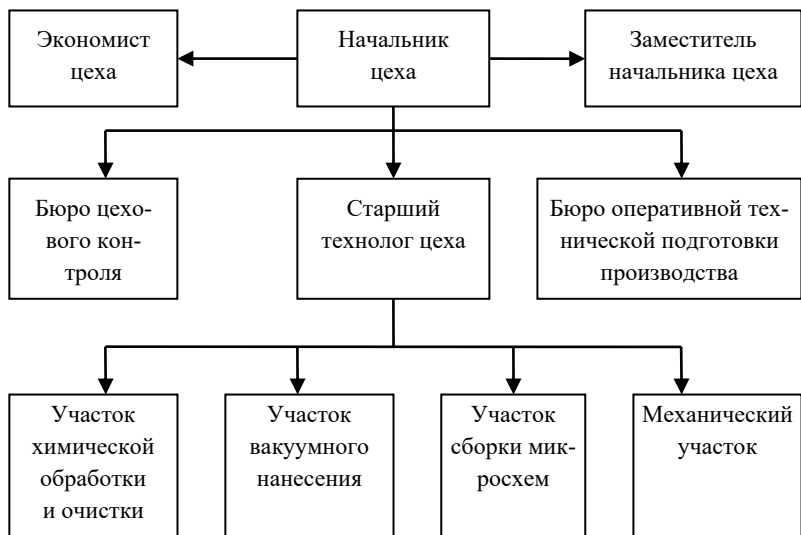


Рис. 36. Структура цеха производства тонкопленочных плат

Характеристики производственных помещений в зависимости от требований вакуумной гигиены для I и II классов приведены в табл. 16. Требования к чистоте помещения III класса регламентируются общими санитарно-гигиеническими нормами и общими требованиями высокой производственной культуры и организации труда. Для обеспечения необходимого микроклимата производственные помещения разных категорий изолируют друг от друга, при этом в помещениях высшей категории создается искусственное давление воздуха, превышающее на 25 ... 50 Па давление в соседнем помещении низшей категории. В производственных помещениях I и II класса применяют системы комбинированной очист-

ки воздуха и кондиционирования, материалы для внутренней отделки, обладающие высокой влагостойкостью, устойчивостью к коррозии и минимальным прилипанием пыли. Для лиц, работающих в помещениях I и II класса, предусматривается специальная технологическая одежда, которая обеспыливается в обдувочном шлюзе при входе в помещение I класса.

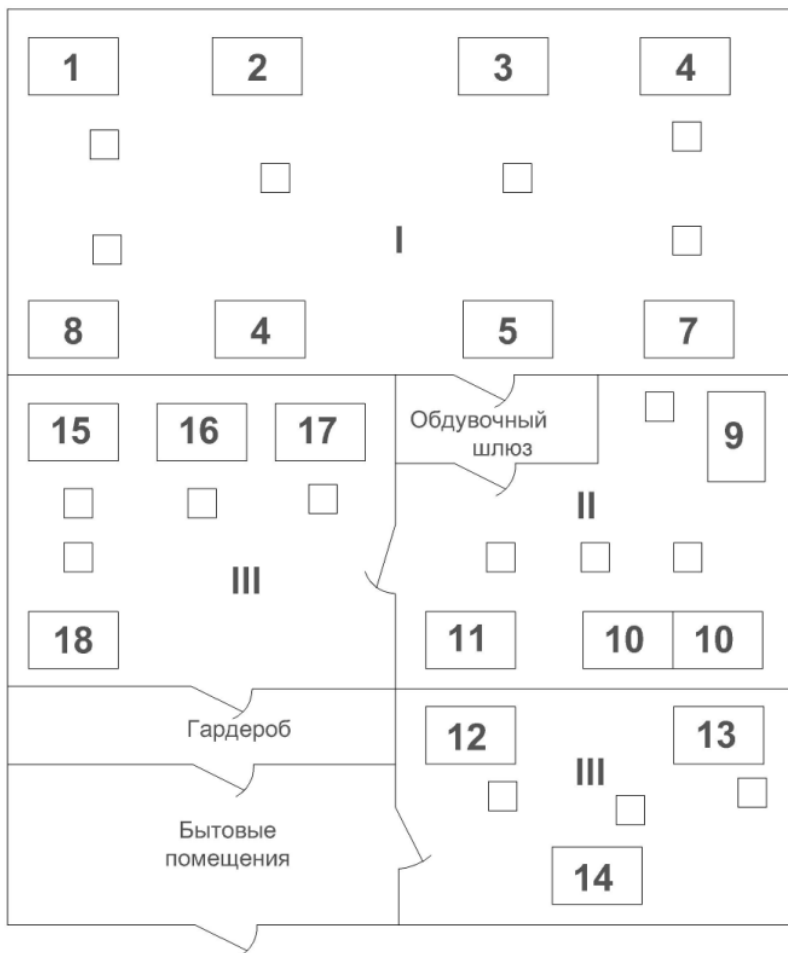


Рис. 37. Схема размещения помещений и рабочих мест на вакуумном участке

Таблица 16. Характеристики производственных помещений

Класс помещений	Количество частиц размером не более 0,5 мкм на 1 л воздуха	Температура °С		Относительная влажность, %
		зимой	летом	
I	4	21 ± 1	23 ± 1	45 ± 5
II	35	20 ± 2	23 ± 2	45 ± 15

3. Технологические маршруты производства толсто пленочных плат МСБ

3.1. Материалы толсто пленочных плат МСБ

В основу толсто пленочной технологии положен метод трафаретной печати, основанный на механическом нанесении соответствующих паст (смесь стеклянного порошка, наполнителя, органического связующего и добавок, обеспечивающих определенную консистенцию) на поверхность подложки через специальный трафарет.

Последовательность операций изготовления толсто пленочной платы, содержащей резисторы, конденсаторы, проводники и пересечения, представлена на рис. 38.

После очистки и отжига подложки на нее наносят и вжигают проводящую пасту (если стороны две, прodelьвают два раза) для формирования проводников, контактных площадок и нижних обкладок конденсаторов, после чего формируют диэлектрик для конденсаторов и пересечений проводников. Верхние обкладки и пленочные перемычки изготавливают из одной пасты. Далее формируют резисторы, имеющие самую низкую температуру вжигания. Последняя операция трафаретной печати – нанесение припойной пасты. Изготовление толсто пленочной платы завершается подгонкой резисторов и конденсаторов.

При термической обработке пасту вжигают и окончательно формируется элемент платы или его составная часть. Резистивный слой создается за один цикл «трафаретная печать-вжигание», а для конденсаторной структуры необходимо повторение указанного цикла как минимум трижды: для нижней обкладки конденсатора, диэлектрика и верхней обкладки конденсатора.

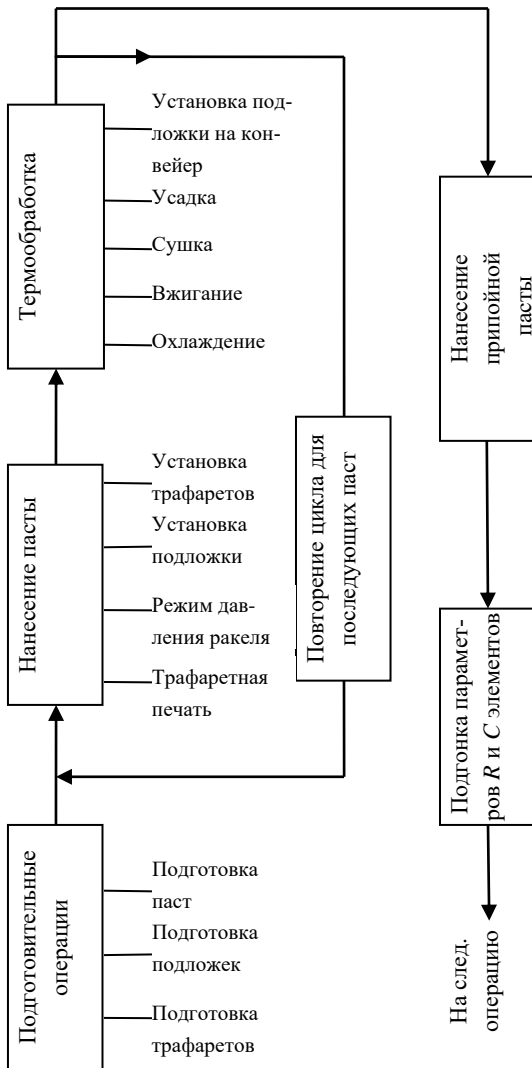


Рис. 38. У крупная схема технологического процесса изготовления толстопленочной платы

В зависимости от типа наполнителя (металлы, оксиды и их смеси) и соотношения стеклянного порошка и наполнителя могут быть получены самые разнообразные типы паст, позволяющие изготовить все виды резисторов и конденсаторов в широком диапазоне значений. Кроме того, существуют специальные припойные пасты и пасты для межслойной изоляции, защитных покрытий и фотополимерные пасты. Применяемые при этом материалы для элементов и подложек ориентированы на использование высокопроизводительных и дешевых технологических процессов, что существенно улучшает экономические показатели производства. Для формирования конфигурации пленочных элементов используется трафаретный способ печати паст специального состава. После предварительной сушки пленочные элементы подвергаются термообработке с целью обеспечения необходимых электрофизических параметров элементов и прочного сцепления их с подложкой. В связи с этим в качестве материалов для подложки используют некоторые виды керамики, которые должны отвечать повышенным требованиям по механическим и тепловым характеристикам: иметь предел прочности при статическом изгибе не менее 140 МПа, коэффициент термического линейного расширения в интервале температур 20–1 000 °С не более 80×10^{-6} К, нагревостойкость до 1 200 °С. Термообработку (вжигание) производят обычно в неконтролируемой газовой среде, т. е. на воздухе, что также снижает стоимость производства. Высокая адгезия пленок к подложке создает возможность непосредственной сварки внешних выводов с контактными площадками. Относительно малые затраты на изготовление толстопленочных плат экономически целесообразно применять и в мелкосерийном производстве.

Однако высокая экономичность процесса приводит в противоречие с качеством изделия. Простота процессов формирования пассивных элементов имеет свои недостатки: относительно высокий разброс параметров резисторов и конденсаторов. Причина заключается в невысокой геометрической точности элементов и в отсутствии контроля и управления физико-химическими процес-

сами при трафаретной печати. В свою очередь, большой разброс значений параметров элементов приводит к необходимости введения в технологический процесс операции подгонки резисторов и конденсаторов.

Подложки. В качестве материалов подложек чаще всего используют керамику на основе оксидов алюминия или бериллия (в зависимости от условий работы МСБ). Применяют материалы с содержанием оксида от 94,0 до 99,8 %. Это позволяет получить высокие механические и электрические характеристики. В настоящее время в толсто пленочной технологии 96%-й оксид алюминия является основным материалом для изготовления подложек. Это связано с высокой механической прочностью, хорошими тепловыми характеристиками, стабильностью в широком температурном интервале и удовлетворительной шероховатостью поверхности. При более шероховатой поверхности адгезия толсто пленочных элементов к керамике повышается.

Одним из основных недостатков как оксида алюминия, так и других керамических материалов, является сложность создания плоских поверхностей. Большинство подложек имеет заметную кривизну. Допускается кривизна 0,1 мм на длине 25 мм. Подложки из оксида алюминия могут быть получены из лент или методом прессования порошков оксидов алюминия, кремния, магния, кальция и других элементов, которые смешиваются и обжигаются при высокой температуре.

Так как в необожженном состоянии подложка очень хрупкая, необходимую форму ей придают путем формовки. Отечественной промышленностью выпускается керамика 22ХС красного или темно-красного цветов, состоящая из оксидов: алюминия (94,4 %), кремния (2,76 %), марганца (2,35 %) и хрома (0,49 %). Такие подложки должны обладать шероховатостью поверхности 0,5...0,75 мкм, что примерно в 10 раз больше, чем у подложек для тонких пленок. В табл. 17 приведены основные параметры керамических подложек.

Таблица 17. Основные параметры керамических подложек

Характеристика	Al ₂ O ₃ 96 %	Al ₂ O ₃ 99,5 %	BeO 99,5 %
Шероховатость поверхности, мкм	0,63	0,20	0,45
Коэффициент теплопроводности, Вт/м°С, при:			
25 °С	35,0	36,7	230
300 °С	17,0	17,5	117
500 °С	10,8	11,0	71,0
800 °С	8,4	8,5	33,0
Относительная диэлектри- ческая проницаемость	9,1	9,6	6,4
Тангенс угла диэлектрических потерь (25 °С, 1 МГц)	0,0027	0,0019	0,0016

Пасты. Пасты, используемые в толсто пленочной технологии, представляют собой тиксотропные (уменьшающие свою вязкость при увеличении давления) смеси, основу которых составляют порошки проводящего материала или диэлектрика, стекла и органической связки. В зависимости от назначения пасты подразделяют на проводниковые, резистивные, диэлектрические для конденсаторов и диэлектрические для межслойной изоляции и поверхностной защиты. Для контактных площадок применяют дополнительное покрытие припойными (лудящими) пастами, не подлежащими вжиганию, но упрощающими процесс последующей пайки выводов.

Любой тип пасты, подлежащей вжиганию, должен содержать три основных компонента: функциональную, конструкционную и технологическую составляющие.

Функциональная составляющая представляет собой частицы неорганических веществ (металлов, окислов металлов, солей), которые определяют основные свойства будущих элементов (проводник, резистор, диэлектрик). В процессе вжигания слоя эти частицы должны оставаться в твердой фазе и равномерно распределиться по объему вжигаемого элемента.

Конструкционная составляющая – частицы стекла, температура плавления которого лежит ниже температуры вжигания. В частности, широко применяют свинцово-боросиликатные стекла (С82-3, С-14, С-5, С-551) с температурой плавления не выше 600°С. В процессе вжигания расплавленное стекло смачивает частицы функциональной фазы, образуя суспензию, а после охлаждения и отверждения образует механически прочное покрытие с квазиравномерным распределением частиц функциональной фазы. Состав конструкционной составляющей должен обеспечивать химическое взаимодействие с поверхностью подложки для повышения адгезии.

Технологическая составляющая играет роль временной технологической связки, которая смачивает частицы порошков функциональной и конструкционной составляющих и придает им пластичность, необходимую для печати через сетчатый трафарет. В процессе вжигания технологическая связка должна полностью удаляться за счет термического разложения, и поэтому ее составляют на основе органических веществ (ланолина, канифоли, вакуумного или вазелинового масла, этилцеллюлозы, терпинеола и др.). Количество вводимой технологической связки должно быть оптимально и не приводить к заметной растекаемости пасты после печати элементов.

Проводниковые пасты выполняют следующие функции: создание соединений между элементами схемы, создание контактных площадок для дискретных элементов, выводов резисторов и обкладок конденсаторов.

После обжига пасты должны обеспечивать следующие характеристики: высокую удельную проводимость, хорошую адгезию

пленки к подложке, поскольку непосредственно к ней присоединяются выводы и навесные компоненты; устойчивость композиции к воздействиям, связанным с выполнением технологических процессов и условиями эксплуатации; свойства пленок не должны изменяться во времени, с изменением рабочей температуры, а также при длительном хранении и в результате термоциклирования.

Функциональной фазой проводниковых паст являются мелкодисперсные низкоомные металлы (размер частиц порядка единиц микрон): серебро, палладий, реже золото. Соотношение содержания металлического порошка и конструкционной связки в пасте ~9:1. В этих условиях возможен массовый взаимный контакт металлических частиц, а удельное поверхностное сопротивление при толщине элемента 10–25 мкм обычно не превышает 0,05 Ом. Такие элементы можно облучивать.

Наибольшее применение находят проводниковые пасты на основе системы Ag–Pd, из которых получают стабильные проводящие элементы, хорошо технологически совместимые с резисторами.

Основные характеристики тонкопленочных проводников полученных на основе серебряных паст и системы Ag–Pd приведены в табл. 18.

Минимальная допустимая ширина пленок диктуется растекаемостью пасты. Растекаемость пасты, т. е. уширение элемента по сравнению с размером трафарета, зависит главным образом от количества и характера технологической связки и составляет не более 150 мкм для паст марок ПП-1 и ПП-2 и не более 20 мкм для пасты ПП-5. Кроме того, пасты ПП-1 и ПП-5 рекомендуется использовать для формирования нижних проводящих слоев, расположенных непосредственно на керамике 22ХС, а ПП-4 (растекаемость не более 50 мкм) – на верхних диэлектрических слоях. Паста ПП-2 инертна к облучиванию и применяется для верхних обкладок конденсаторов. Инертность к облучиванию достигается за счет увеличения содержания стекла, в связи с чем удельное поверхностное сопротивление пасты возрастает до 0,5 Ом. Раз-

личие температур вжигания (например, для ПП-1 – 850 °С, для ПП-2 – 750 °С) позволяет выбирать пасты с учетом последовательности формирования слоев и возможности их повторного обжига. Точность размеров в плане для проводниковых элементов лежит в пределах $\pm(0,05-0,1)$ мм.

Таблица 18. Толстопленочные проводники на основе серебра и системы Ag-Pd

Характеристика	Тип пасты						
	ПП-1	ПП-2	ПП-3	ПП-4	ПП-5	КСС-1	КСС-2
ρ_s , Ом/кв	0,05	0,5	0,05	0,05	0,05	0,003	0,005
Прочность Сцепления пленки с керамикой, кГ/см ²	50	–	50	–	50	≥ 50	≥ 50
Растекаемость паст, мкм	150	150	50	50	20	30	50

В технически и экономически обоснованных случаях, например при повышенных требованиях надежности и стабильности, используют золотые пасты ПЗП-1, ПЗП-2, ПЗП-3. Пасту ПЗП-3 используют, в частности, для вжигания при $t = 950$ °С монтажных площадок в керамических корпусах; пасту ПЗП-2 – для металлизации контактных площадок в микросборках на основе многослойной керамики. С помощью пасты ПЗП-1 можно формировать прецизионные проводниковые элементы с $R_{сл} < 0,005$ Ом, прочностью сцепления свыше 10 МПа и растекаемостью менее 20 мкм (температура вжигания 850–950 °С).

Пасты ПП-8 и ПП-10 рекомендуется использовать для создания проводников, нижних обкладок конденсаторов и нижнего проводникового слоя в многослойных коммутационных платах.

Пасту ПП-9 рекомендуется использовать при создании верхней разводки на диэлектрическом слое при изготовлении многослойных коммутационных плат.

Пасты ПП-11...ПП-17 предназначены для изготовления проводников, контактных площадок и электродов толсто пленочных пассивных элементов.

Пасты ПП-11...ПП-14 с высоким содержанием палладия отличаются высокой стойкостью к разлегированию и малым значением миграции серебра.

Пасты ПП-15 и ПП-16 с низким содержанием палладия, так же как и чисто серебряная паста ПП-17, характеризуются низким удельным сопротивлением и используются в изделиях, где миграция серебра не является критическим фактором.

Пасты проводниковые на основе серебра – палладия ПП-20 и ПП-21 применяются при изготовлении толсто пленочных плат микросхем и МСБ для создания коммутационной разводки в условиях серийного производства. Такие пасты совместимы с резистивными пастами на основе серебра – палладия и диэлектрическими пастами и обладают высокой точностью печати и низкой растекаемостью (табл. 19).

В технологической себестоимости толсто пленочных микросхем стоимость паст на основе драгоценных металлов может достигать 50 %. В связи с этим большое внимание уделяется разработкам проводниковых паст на основе неблагородных металлов: алюминия, меди, никеля.

Пасты на основе меди хорошо паяются припоем ПОС-61, но требуют специальной обработки частиц меди для предохранения их от окисления при комнатной температуре, а также контролируемой среды при вжигании (азот или аргон). Для прочности сцепления с подложкой необходимо вводить в состав пасты окислы металлов, образующие химическую связь с окисью алюминия подложки. Оптимальная среда для вжигания медных паст – аргон, а оптимальная температура для подложек из 22ХС – 950 ± 10 °С с выдержкой 10 мин.

Таблица 19. Свойства проводниковой пленки после вжигания паст

Характеристики	ПП-20	ПП-21
Сопротивление квадрата пленки, Ом/кв, не более	0,05	0,05
Минимальная ширина линий, мкм	150	200
Минимальное расстояние между линиями, мкм	150	200
Толщина пленки, мкм	18–25	18–25
Адгезия к подложке из окиси алюминия, Н/см ² , более	500	–
Адгезия к изоляционному слою паст типа ПИ, Н/см ² , более	–	500
Условная вязкость по растекаемости при температуре (21 ± 3) °С, мкм	22,5 ± 1,50	22,5 ± 1,50

Пасты на основе алюминия и никеля можно вжигать на воздухе, но их практически невозможно паять.

Резистивные пасты включают в себя в качестве функциональной фазы частицы металла и окисла металла. Частицы окисла металла, обладающие изоляционными и полупроводниковыми свойствами, «разобщают» частицы металла, которые в результате образуют проводящие цепочки. С уменьшением содержания металла удельное поверхностное сопротивление резистивных слоев возрастает. Широкое применение находят серебряно-палладиевые резистивные пасты типа ПР, которые выпускают в двух сериях с удельным поверхностным сопротивлением 5 Ом – 50 кОм (ПР-5, ПР-20... ПР-20К, ПР-50К) и 50 кОм – 1 МОм. Функциональная фаза состоит из палладия и Ag₂O. В качестве конструкционной связки используют стекло № 660. Для получения пасты нужного

номинала можно смешивать пасты двух соседних номиналов. После смешивания измеряют удельное поверхностное сопротивление по методике, приведенной в ТУ на пасту, и при необходимости производят корректировку повторным добавлением и смешиванием. Пасты на основе серебро – палладий при вжигании хорошо сочетаются с проводниковыми пастами ПП-1, ПП-3, ПП-4 и ПП-5.

К недостаткам серебряно-палладиевых резистивных паст относятся: высокую чувствительность к режимам термообработки, низкую стабильность к воздействию водорода (выделяется при разложении технологической органической связки) и высокую стоимость.

Для прецизионных резисторов используют пасты на основе окиси рутения (RuO_2) с добавками окислов различных металлов. Для получения высоких значений $R_{\text{СЛ}}$ применяют пасты состава: 40–13 % RuO_2 и 60–87 % стекла № 279 (помимо технологической связки). Диапазоны значений $R_{\text{СЛ}}$ от 5 Ом до 1 МОм. Рутениевые пасты имеют высокую стоимость.

Ограниченное применение находят резистивные пасты типа ПРИ и ПРС (на основе окиси индия). Эти пасты имеют пониженную стабильность.

Толщина вожженных резисторов обычно лежит в пределах 15–20 мкм. Основные характеристики различных резистивных паст приведены в табл. 20. Указанные пасты вжигают на воздухе.

Диэлектрические пасты подразделяют на два вида: для диэлектриков конденсаторов (типа ПК) и для межслойной изоляции (типа ПД).

Конденсаторные пасты должны обеспечивать удельные емкости порядка тысяч пикофарад на 1 см^2 при толщинах пленки до 40 мкм. В связи с этим функциональную фазу составляют из порошков сегнетоэлектриков (например, титаната бария BaTiO_3), имеющих высокие значения диэлектрической проницаемости. Особые требования предъявляются при этом к конструкционной связке, которая должна не реагировать с функциональной основой, обеспечивать сплошность структуры и образовывать тонкие прослойки

между функциональными частицами (для обеспечения высоких значений ϵ). Паста ПК-1000-30 на основе титаната бария хорошо совмещается с проводниками на основе серебряно-палладиевых паст и вжигается при $t = 650$ °С. При толщине 25–30 мкм она имеет удельную емкость 3 700–10 000 пФ/см², т. е. того же порядка, что и тонкопленочные конденсаторы.

Таблица 20. Резистивные пасты

Паста	ρ_s , Ом/кв	ТКС $\cdot 10^{-4}$, °С ⁻¹	$\Delta R/R$, %	Температура вжигания, °С
Палладий- серебряная	10... ...10 ⁶	4...10	1...4	760
Рутениевая	5... ...2 $\cdot 10^7$	0,5...4	0,5...2	700...900
Индиевая	5 $\cdot 10^5$10 ⁶	4...20	3...10	900...1 000
Таллиевая	50... ...10 ⁶	1...2	1...2	550...600
Вольфра- мовая	10 ⁴10 ⁶	5...10	1...3	700...1 000
Кадмиевая	10... ...5 $\cdot 10^6$	4...6	2...4	700...900
Боридная	10 ²10 ⁵	0,5...10	2...4	800...900
Молибдено- вая	10... ...10 ⁵	0,5...6	1...2	635

Пасты для межслойной изоляции и защитных покрытий должны обладать удельной емкостью не выше 200 пФ/см². Толщина изоляционных слоев достигает 70 мкм. Такие пасты составляют на основе стекол, которые в этом случае одновременно являются и функциональной, и конструкционной фазами. Например,

пасту ПД-2 составляют на основе стекла СУ-273 с добавкой Al_2O_3 в качестве наполнителя. В состав органической связки входят ка-нифоль, стеариновая кислота, вазелиновое масло, ланолин, ваку-умное масло. Паста обеспечивает $C_0 = 120$ пФ/см² при пробивном напряжении 500 В.

Основная технологическая задача при формировании слоев из стекол заключается в том, чтобы избежать растекания слоя в про-цессе вжигания, а также при повторных нагревах. Растекаемость уменьшает толщину слоя, за счет чего возрастает удельная ем-кость, а также приводит к затеканию стекла на контактные пло-щадки. В табл. 21 приведены характеристики пленки на основе ситаллоцемента СЦ-273 и его композиций.

Таблица 21. Пленки на основе ситаллоцемента СЦ-273 и его композиций

Характеристика	Тип пасты			
	СЦ-273	ПД-8	ПД-9	ПД-19
Е, диэл. прониц.	13...15	13,8	13,2	14
Суд, пФ/см ²	220	180	180	180
$tg\delta \cdot 10^{-4}$ ($f = 1$ МГц, 20 °С)	30...35	30	27	25
Растекаемость, мкм	40...50	20	20	15

Хорошие результаты при создании межслойной изоляции да-ют пасты на основе ситаллоцементов, в которых при нагревании образуется кристаллическая фаза (по типу ситаллов), предотвра-щающая размягчение слоя при повторных нагревах. Например, ситаллоцемент марки СЦ-273, синтезированный на основе стекол системы $SiO_2-PbO-ZnO-TiO_2$, вжигается при температуре 750 °С. Для уменьшения его растекания при вжигании вводят наполнители: порошок Al_2O_3 (15–20 масс. %) и порошок 22ХС (0–5 масс. %).

Удельная емкость в этом случае составляет 180 пФ/см^2 при толщине слоя 60–70 мкм. При той же толщине ситаллоцементы СЦ-215 и СЦ-36 на основе $\text{SiO}_2\text{--BaO--Al}_2\text{O}_3$ с порошком 22ХС обеспечивают $C_0 = 120 \text{ пФ/см}^2$.

Припойные пасты. Сборка и монтаж микросхем и МСБ ускоряется, а также повышается качество сборки с использованием лудящих (припойных) паст. Припойная паста представляет собой смесь порошка низкотемпературного припоя и органической связки, в состав которой входит флюс. Отечественная промышленность выпускает ряд припойных паст, в числе которого ПЛ1-1 (на основе канифольного флюса), ПЛ1-3 (на основе водорастворимого флюса), а также пасты КЛ-1 и КЛ-2 (табл. 22).

Таблица 22. Отечественные припойные пасты

Характеристики	Тип пасты			
	ПЛ1-1	ПЛ1-3	КЛ-1	КЛ-2
Рабочая температура оплавления, °С	220... ...250	220... ...250	170... ...180	140... ...150
Прочность сцепления с поверхностью проводников, кГ/см ²	≥50	≥50	≥50	≥50
Растворитель для удаления остатков органики после пайки	спирт, бензин – –1:1	Горячая вода	спирт, диметил- форма- лид – –1:1	спирт, диметил- форма- лид – –1:1

Одним из основных методов нанесения припойных паст является трафаретная печать. Качество трафаретной печати и количество пасты определяется не только свойством пасты, но и типом трафарета, его толщиной и площадью участков, на которые необходимо нанести припой. В данном процессе предпочтительно использование сетчатого трафарета с размером ячейки 0,08...0,18 мм или трафарета из металлической фольги для нанесения более толстых слоев.

3.2. Трафаретная печать и термообработка паст

Принцип трафаретной печати заключается в продавливании пасты через открытые участки трафарета, соответствующие рисунку топологического слоя, с помощью ракеля на подложку. Перенос рисунка трафарета на подложку возможен контактным (рис. 39, а) и бесконтактным (рис. 39, б) способами.

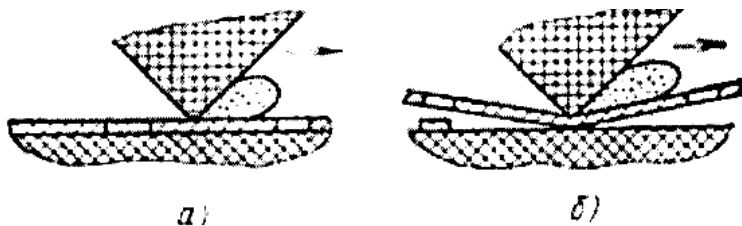


Рис. 39. Схемы контактной (а) и бесконтактной (б) трафаретной печати

При контактном способе трафарет, изготовленный на основе бериллиевой бронзы БрБ-2 толщиной 0,05 мм с никелевым покрытием толщиной 10–13 мкм (фольговый биметаллический трафарет), плотно прилегает к поверхности подложки.

Фольговые трафареты обеспечивают максимальное разрешение до 70 мкм, допускают не менее 1 000 циклов печати до износа

и применяются при повышенных требованиях к четкости рисунка (схемы с высокой степенью коммутации).

При бесконтактном способе трафарет располагают над подложкой с зазором 0,25...1,25 мм (в зависимости от размеров трафарета). Формирование элементов происходит последовательно при движении ракеля за счет упругой деформации трафарета и при перемещении линии контакта трафарета с подложкой. Конструкционной основой такого трафарета является проволочная сетка из нержавеющей стали, несущая маскирующее покрытие из светочувствительного материала (рис. 40). Перед изготовлением маскирующего покрытия сетку устанавливают в специальную рамку и натягивают равномерно по контуру с усилием, обеспечивающим необходимую упругую деформацию сетки под действием нагрузки.

Сетчатые трафареты имеют более широкое применение. В зависимости от материала и технологии нанесения маскирующего покрытия сетчатые трафареты имеют максимальное разрешение 100–150 мкм и стойкость 400–2 000 циклов печати. Более высокие разрешение и стойкость имеют покрытия на основе пленочных фоторезистов СПФ и ТФПК и особенно на основе светочувствительного состава ФСТ.

Важной характеристикой сетчатых трафаретов является размер ячеек сетки. В толстопленочной технологии используют сетки ряда 0040, 0056, 0071, 0080, 00140 по мере возрастания размера квадратных ячеек, увеличения толщины проволоки и уменьшения числа ячеек на 1 мм длины (табл. 23).

При некоторой фиксированной вязкости пасты более мелкие ячейки образуют более четкий контур элементов, а при заданной толщине элементов в этом случае требуются большие усилия со стороны ракеля. При ограниченной растекаемости пасты и мелких ячейках сетки получают неоднородную по толщине пленку с регулярными неровностями. Крупные ячейки позволяют формировать при прочих равных условиях более толстые пленки с большей однородностью толщины. Для проводниковых и резистивных слоев часто используют, например, сетки 0040 с диаметром проволоки 30 мкм, а для диэлектрических – 0056 (диаметр проволоки 40 мкм).

Зазор между сеткой и подложкой зависит от габаритов сетки и должен обеспечивать хорошее пружинение сетки, от которого зависит четкость контура элементов. С уменьшением размеров трафарета жесткость сетки повышается и оптимальный зазор уменьшается.

Ракель изготавливают из упругого износостойкого и стойкого к органическим растворителям материала, для чего широко используют полиуретан и фторкаучук.

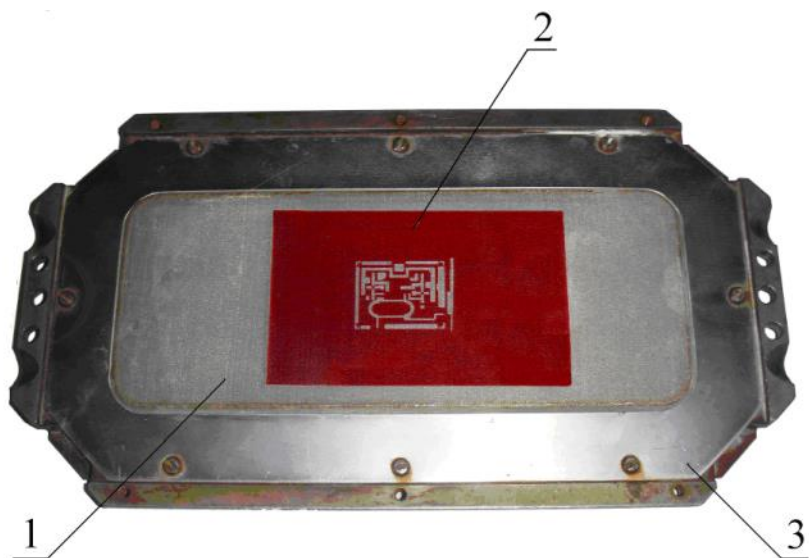


Рис. 40. Трафарет для нанесения паст: 1 – металлическая сетка; 2 – рисунок слоя на фоторезисте; 3 – рама

Угол наклона передней (рабочей) поверхности ракеля к плоскости подложки рекомендуется выбирать равным 45–60°. Скорость рабочего хода ракеля определяется главным образом вязкостью пасты и требуемой толщиной наносимого на подложку слоя и может достигать 100–120 мм/с.

Если состав и вязкость пасты, а также применяемая сетка соответствуют техническим условиям, то настройка процесса печати

сводится к отысканию оптимальных режимов (зазора, а также скорости и давления ракеля). Настройку производят в сочетании с визуальным контролем пробных образцов, включая в нее также совмещение рисунка трафарета (например, резисторов) с рисунком элементов на подложке, полученном на предыдущем этапе (например, межсоединений и контактов).

Таблица 23. Характеристика сеток с мелким переплетением

Число отверстий, материал	Диаметр нити, мкм	Размер ячеек, мкм	Толщина сетки, мкм
280/СС	30	61	76
280-С/Н	33	58	51
280-Н/Д/Д	41	46	66
280-Т/МП	37	54	55...65
300/СС	32	56	71
306-С/Н	30	53	44
305-Т/Д	33	51	57...65
325/СС	28	51	71
330-С/Н	30	46	47
330-Т/Д	33	43	61...62
330-Т/МП	38	31	–
400/СС	25	38	56
380-С/Н	30	35	48
390/Д	33	32	55
390-Т/МП	38	31	–

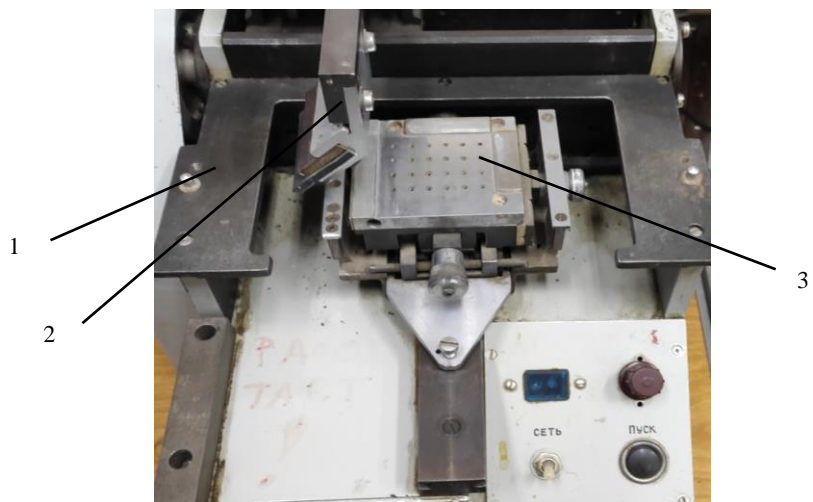
Примечание: СС – стальная сетка, Н – нейлон, Д – дакрон, МП – металлизированный полиэфир, Т – текстильная нить.

Для нанесения паст применяют полуавтоматические и автоматические установки, обеспечивающие высокую точность (до $\pm 0,0125$ мм) и производительность (до 1 200 отпечатков в час). На рис. 41 представлен полуавтомат трафаретной печати (ППП-1), конструктивно выполненный в настольном варианте с элементами базирования, крепления и настройки основных узлов установки. Технические характеристики установки приведены в табл. 24. Основой установки служит микрометрический стол на каретке 2, который одновременно является подложкодержателем. Подложкодержатель выполнен с множеством отверстий для вакуумного прижима подложки.

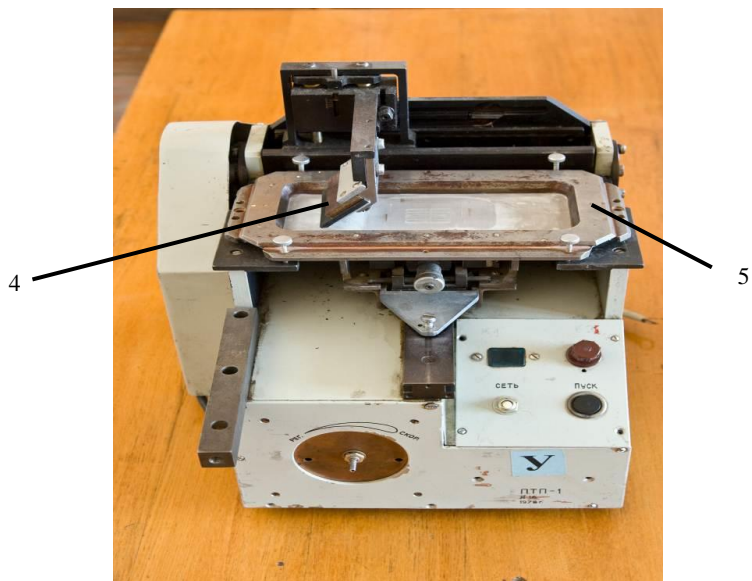
Сетчатый трафарет 5 устанавливают отверстиями на базовые штифты неподвижной части стола 1. Таким образом осуществляется предварительное базирование трафарета относительно подложки. Точное базирование производится с помощью микрометрических винтов подвижного микрометрического стола 3. Окончательно закрепляют подложку вакуумным прижимом путем откачки воздуха через отверстия подложкодержателя. Зазор между сеткой трафарета и плоскостью подложки регулируют четырьмя винтами, расположенными на раме трафарета (рис. 41, б).

По мере продвижения ракеля 4 паста заполняет открытые участки трафарета и под действием давления входит в контакт с подложкой и прилипает к ней, образуя отпечатанный через трафарет рисунок. После прохождения ракелем места нанесения пасты трафарет отходит от поверхности подложки. Высота положения ракеля регулируется с помощью микровинта так, чтобы последний достаточно плотно прилегал к сетке трафарета и создавал контакт между трафаретом и поверхностью подложки.

Давление на пасту, возникающее при перемещении ракеля, зависит от скорости перемещения ракеля, угла его наклона, поверхности трафарета и плотности прилипания ракеля к трафарету. От сочетания указанных факторов зависит толщина печатных элементов, их четкость и воспроизводимость. По мере увеличения скорости возрастает давление, под действием которого за меньшее время через отверстия продавливается большее количество пасты.



а)



б)

Рис. 41. Полуавтомат трафаретной печати ПТП-1: а – без трафарета, б – с трафаретом; 1 – неподвижный стол с двумя штифтами, 2 – каретка, 3 – подвижный микрометрический стол с подложкодержателем, 4 – ракель, 5 – трафарет

Таблица 24. Технические характеристики ПТП-1

Параметры	Величины
Размеры подложки, мм	не более 60 x 48
Максимальное перемещение стола по осям X и Y, мм	10
Угол поворота стола, град	$\pm 7,5$
Рабочий ход, мм	70
Скорость ракеля, мм/с	10–80
Давление ракеля, кг/см ²	146
Питание	220 В
Габариты, мм	815*340*360
Масса, кг	50

Кроме того, большинство паст по своему составу представляют собой вещества, у которых вязкость уменьшается с увеличением сдвигающего усилия или с возрастанием скорости. При уменьшении угла наклона возрастает количество продавливаемой пасты и соответственно увеличиваются толщины отпечатанных элементов, а при малых углах наклона ракель проскальзывает через пасту. Перемещение ракеля должно быть плавным, с постоянной скоростью, в противном случае напечатанные элементы будут иметь различную толщину. В зависимости от свойств пасты и силы давления на ракель, профиль нанесенного на подложку слоя может быть различным.

В процессе рабочего хода (слева направо) ракель собирает излишки нанесенной пасты. При возвращении в исходное положение (холостой ход) ракель приподнимается над трафаретом.

Вжигание паст. Печатание каждого последующего слоя должно, как правило, выполняться только после сушки и вжигания предыдущего. Таким образом, процесс формирования толсто пленочных элементов состоит из ряда последовательных циклов «печать – сушка – вжигание». При определенной последовательности слоев выбор конкретных марок паст определяется в основном двумя факторами: максимальной температурой вжигания, которая указывается в ТУ на данную пасту (каждый последующий слой должен вжигаться при более низкой температуре, чем предыдущий), и чувствительностью данного слоя к повторным нагревам, связанной главным образом с возможностью размягчения и растекания пасты, что ухудшает геометрическую точность и изменяет электрофизические параметры слоя.

В качестве примера приведем последовательность формирования слоев в микросхеме с одноуровневой разводкой, содержащей резисторы и конденсаторы (температуры вжигания проводниковой пасты $\sim 800^\circ\text{C}$, диэлектрической $\sim 700^\circ\text{C}$, резистивной $\sim 650^\circ\text{C}$) (рис. 42).

Отдельные этапы различных циклов можно совмещать. Например, при использовании двух резистивных паст с различным значением RCL для отдельного формирования низкоомных и высокоомных резисторов можно выполнять два последовательных цикла «печать – сушка», а затем совместно вжигать резисторы обеих групп. При нанесении диэлектрика для конденсаторов возможна сквозная пористость слоя. В этом случае диэлектрик наносят двукратно (эффект грунтовки) с промежуточной сушкой, а для уменьшения диффузии металла нижней обкладки в диэлектрик – совместно вжигают верхнюю обкладку и слои диэлектрика.

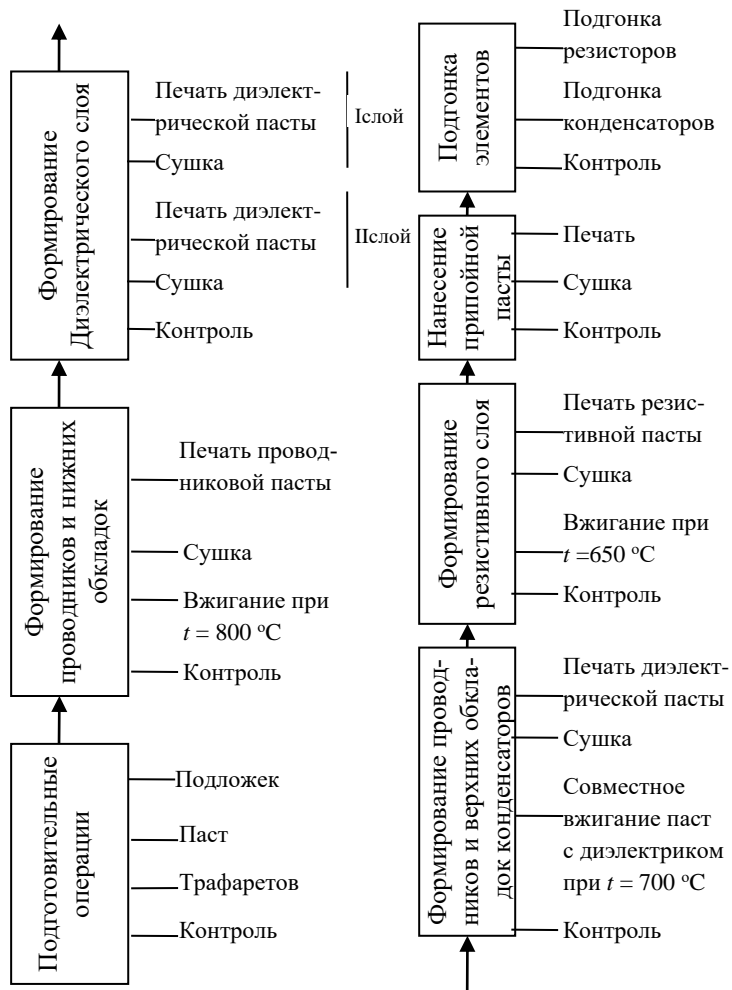


Рис. 42. Последовательность формирования слоев в толсто пленочной микросхеме с одноуровневой разводкой, содержащей резисторы и конденсаторы

Нанесенный слой высушивают с целью удаления летучего компонента органической связки и таким образом повышения вязкости и отпечатанных элементов. Во избежание бурного выделения растворителей (летучих компонентов) и нарушения целостности нанесенного слоя необходимо постепенно повышать температуру и применять ИК-источники нагрева. Для различных паст максимальная температура при сушке лежит в пределах от 120 до 400 °С. В соответствии с этим для сушки можно использовать либо сушильные шкафы (периодического действия), либо конвейерные печи непрерывного действия.

В зависимости от состава пасты и назначения слоя длительность цикла термообработки составляет 1–1,5 ч. На рис. 43 показан профиль распределения температур по ходу конвейера в печи для жигания. Восходящую ветвь температурного цикла вжигания можно условно разделить на три этапа (по мере повышения температуры):

Разложение и удаление нелетучих компонентов органической связки. На этом этапе, граница которого соответствует 300–400 °С, скорость подъема температуры должна быть невысокой (~20 °С/мин) для постепенного выгорания органической связки. Для ослабления окислительно-восстановительных процессов, протекающих за счет выделения кислорода и водорода при разложении связки и способных изменить электрические свойства функциональной фазы, необходима принудительная вентиляция.

Размягчение, а затем расплавление стеклянной связки, смачивающей поверхность керамической подложки и образующей суспензию частиц функциональной фазы. На этом этапе скорость подъема температуры может быть увеличена до 50–60 °С/мин.

Начало физико-химического взаимодействия стекла с поверхностным слоем керамики, обеспечивающего адгезию. Окислы, входящие в состав стекла, образуют химическую связь с окисью алюминия и керамики. Физическое взаимодействие состоит в заполнении стеклом микровпадин на поверхности, включая микропоры, вскрытые при шлифовании подложек.

Для завершения формирования слой выдерживают при постоянной температуре в течение 10–20 мин, после чего медленно охлаждают во избежание его растрескивания из-за разности ТКЛР слоя и подложки. Температурный режим должен воспроизводиться для каждой подложки с высокой точностью. Так, скорость изменения температуры должна выдерживаться с точностью ± 2 °С/мин, а максимальная температура (температура выдержки) – с точностью ± 1 °С.

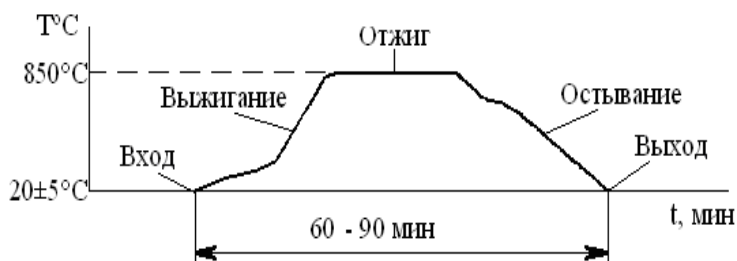


Рис. 43. Профиль распределения температур по ходу конвейера в печи для вжигания

Требуемый температурный режим и точность его поддержания проще всего реализовать с помощью конвейерных электропечей непрерывного действия, например печи СК-10/16.6-5 (табл. 25). Такие печи эффективны как в крупносерийном, так и в мелкосерийном производстве.

Таблица 25. Технические характеристики электропечи конвейерной линии СК- 10/16.6-5

Диапазон рабочих температур, °С	200–1 000
Число тепловых зон	5

Окончание табл. 25. Технические характеристики электropечи конвейерной линии СК- 10/16.6-5

Точность поддержания температур, °С: на уровне 200–600 °С для зон 1–5 600–1 000 °С для зон 1 и 5 600–1 000 °С для зон 2, 3 и 4	±2 ±2 ±1
Диапазон регулирований скорости конвейера, мм/мин	(15... ...150) ± 10 %
Регулируемый наклон канала печи, град	3
Размер рабочего пространства (ширина, высота, длина), мм	160× 60× 2 610
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	2
Максимальная потребляемая мощность, кВт	40
Размеры (длина, ширина, высота), мм	4 950× 1 125× 1 360
Масса, кг	2 000

3.3. Технологические маршруты производства толсто пленочных плат микросборок на стальных эмалированных подложках

При разработке МСБ, в состав которых входят высокоомощные транзисторы и резисторы, возникает проблема отвода тепла. Поэтому кроме керамических подложек из оксида алюминия применяют стальные эмалированные подложки (СЭП). Основными преимуществами таких подложек по сравнению с керамическими и ситалловыми являются их высокие значения теплопроводности, термостойкости, механической прочности, а также низкая стоимость при массовом производстве. СЭП позволяют также совме-

щать на одном основании толсто пленочные и тонко пленочные микросхемы, монтировать бескорпусные элементы и полупроводниковые интегральные микросхемы непосредственно на металлическое основание. К недостаткам СЭП относят возможное увеличение массы, ограниченность частотного диапазона (до 400 МГц), наличие дополнительных паразитных емкостей, возможность образования в эмали макро- и микротрещин.

Входящие в технологический маршрут производства плат на СЭП операции можно разделить на три основные группы: операции изготовления СЭП, операции создания толсто пленочных элементов, монтаж и присоединение выводов навесных компонентов (рис. 44).

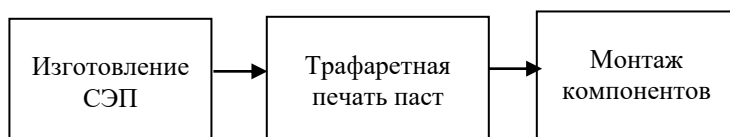


Рис. 44. Основные операции технологического процесса изготовления микросборки на СЭП

Изготовленные по этой технологии СЭП имеют ТКЛР(1...19) × 10 – 6 1/град. Гибридные БИС и МСБ на таких СЭП можно эксплуатировать при повышенных температурах и влажности.

На рис. 45 приведен технологический маршрут производства стальной эмалированной подложки. Технологический маршрут изготовления СЭП состоит из следующих операций: формирование стальной заготовки (штамповка, сверление отверстий); снятие фасок и заусенцев; травление (для придания шероховатости); промывка; нанесение никеля гальваническим методом (для улучшения адгезии), нанесение эмали; сушка; обжиг эмали. После обжига на поверхности стали образуется эмалевое покрытие толщиной 50...150 мкм. Максимальная рабочая температура такой подложки составляет 800 °С. Металлическое основание СЭП формируется

штамповкой из листовой (толщина 0,5...1,0 мм) малоуглеродистой стали. После сверления необходимых отверстий и снятия фасок стальное основание подвергается обработке в кислотном травителе для придания шероховатости поверхности и улучшения адгезии эмали.

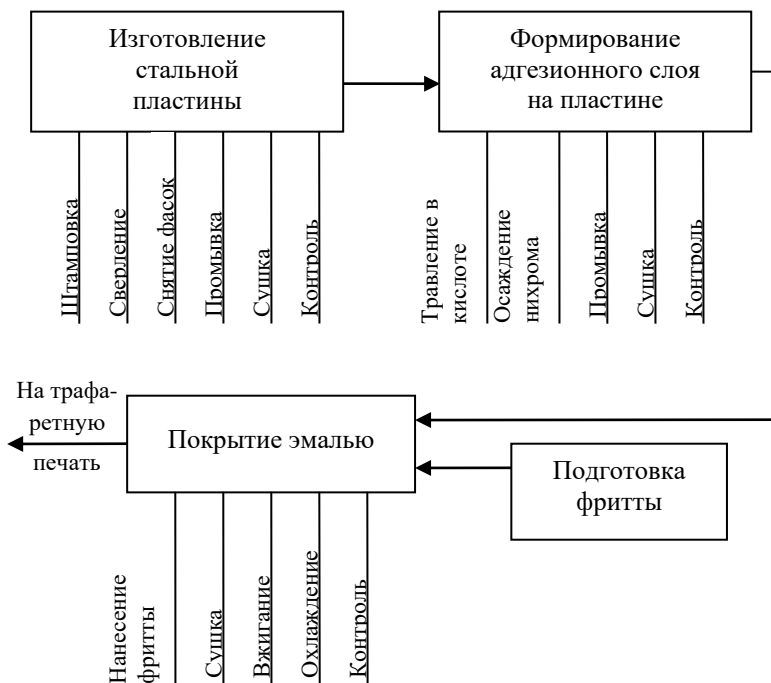


Рис. 45. Технологический маршрут производства стальной эмалированной подложки

После подготовки поверхности стального основания производится осаждение стеклянной фритты (чаще методом электрофореза). Для увеличения электрической прочности или в случае некачественного покрытия в отверстиях подложки фритта может наноситься дважды. Эмаль наносят как на одну, так и на обе стороны подложки. При одностороннем покрытии фритта может наноситься

ся разбрызгиванием (пульверизацией). Покрытие сушат при температуре 300 °С в течение 4 ч. Фритту вжигают в кислородосодержащей атмосфере при температурах 700...900 °С.

Для создания диэлектрических покрытий на стальных основаниях начали использовать и керамику, применяя распыление в плазме дугового разряда алюмооксидной керамики (96 % Al_2O_3) или композиции на ее основе с весовыми добавками 2 % окиси титана. При использовании в качестве основания СЭП нержавеющей стали на сталь наносят хромовую пленку в качестве адгезионного слоя для лучшей адгезии эмали к подложке.

Методы нанесения толстых пленок на СЭП почти не отличаются от применяемых в обычной толстопленочной технологии, за исключением того, что СЭП имеют гораздо большие размеры, чем керамические ($10^2...10^3$ см²). В основном используют трафаретную печать через проволочный трафарет; иные методы нанесения пасты – пульверизация, нанесение кисточкой. Для обеспечения качественного покрытия стенок сквозных отверстий двусторонних СЭП применяют специальные пасты с необходимыми свойствами (вязкостью, поверхностным натяжением), обеспечивающими затекание в отверстия и обволакивание краев отверстий пастой. Высокие технологические характеристики эмали позволяют использовать большое число различных совместимых с СЭП проводниковых, резистивных и диэлектрических паст.

Пасты для разводки на СЭП. Наиболее широко применяют проводниковые пасты на основе Au, Ag, Ag+Pt, Ag+Pd, Ag+Pd+Pt и других благородных металлов, которые совмещаются с резистивными пленками из окиси рутения и многими диэлектрическими материалами.

Пасты на основе благородных металлов вжигают при максимальных температурах 700...900 °С на воздухе. Суммарный цикл вжигания составляет 45...60 мин. Время вжигания при максимальной температуре 5...10 мин. Пасты на основе составов серебро – платина обладают хорошей адгезией к эмали, хорошо паяются и свариваются. Они вжигаются на воздухе при темпе-

ратуре 850...925 °С. Получена минимальная ширина проводников – 0,2 мм.

Высокое разрешение по ширине толсто пленочных проводников из золота и серебра – 50 мкм и выше (для обычных методов трафаретной печати от 75 мкм до 125 мкм) получено на СЭП путем применения в качестве маски позитивного полимерного фоторезиста, на который экспонируется требуемый рисунок схемы. Проводящая паста, представляющая суспензию мелкодисперсного металлического порошка (с размерами менее 40 мкм) и стеклянной фритты, наносится кисточкой и прилипает к вязкой поверхности неполимеризованных участков фоторезиста.

В процессе последующей термообработки (при температуре 800...900 °С) фоторезист полностью выгорает, а проводниковая паста расплавляется и спекается с подложкой. Толщина получаемых пленок проводников от 3 до 7 мкм, т. е. находится ближе к толщине тонких (около 1 мкм), а не толстых (50...70 мкм) пленок.

Наибольшее внимание уделяется технологии применения паст на основе благородных металлов (Cu, Ni, Al), что связано с повышением цен на золото, серебро, палладий и платину, а также с некоторыми технологическими преимуществами медных проводящих паст и невысокой ценой. Цена проводящих медных паст составляет примерно 50 % от цены серебряных паст. Толщина проводящих пленок на основе меди составляет 150...200 мкм. Пленки на основе меди при высокой адгезии к СЭП обладают хорошей способностью к пайке, сварке, высокой устойчивостью к растворителю в припое.

Элементы и защитные покрытия. Резистивные пасты для СЭП изготавливают как на базе благородных металлов (Cu, Ni, Cr), так и на основе окиси рутения.

Методы приготовления и нанесения на СЭП резистивных паст на основе благородных металлов, а также технологические режимы сушки и обжига в основном такие же, как и для соответствующих проводящих паст, но используются трафареты с

меньшими размерами отверстий в сетке. Резистивные пленки благородных металлов вжигаются в среде азота, имеют удельные сопротивления от 10 Ом/кв до 2 Ом/кв и хорошо совмещаются с медными проводящими пленками. Наиболее часто используемые для СЭП резистивные пленки на основе окиси рутения имеют удельное сопротивление от 100 Ом/кв до 1 Ом/кв и вжигаются на воздухе. Для соединения с этими резистивными пленками используются проводящие пленки из золота и сплава серебро – палладий.

Для изоляции мест пересечений проводников в многоуровневых коммутационных структурах на СЭП разработаны эмалевые покрытия на основе кристаллизирующихся стекол. Состав эмалей для межслойной изоляции подбирается из условия наибольшего приближения ее к ТКЛР эмали на СЭП. Согласование по ТКЛР достигается за счет подбора добавок-модификаторов, аналогичных модификаторам эмали СЭП. Кроме этого, состав эмали должен обеспечить качественную диэлектрическую пленку. Основной проблемой стеклокристаллической эмали для межслойной изоляции медных пленочных проводников является возможность диффузии ионов меди в эмаль и взаимодействие этих ионов с компонентами эмали, что приводит к значительному снижению сопротивления изоляции и может быть причиной короткого замыкания между соседними уровнями коммутации.

Эмалевая пленка для межслойной изоляции наносится методом трафаретной печати. Применяются такие же трафареты, как и для нанесения проводниковой пасты. Технологические режимы сушки и вжигания эмали совпадают с режимами для вжигания проводящих и резистивных паст. Вжигание проводится в нейтральной среде, когда используются медные проводники. Для этого же состава эмали вжигание осуществляется на воздухе в случае применения проводников из благородных металлов.

Процесс нагрева при вжигании не должен быть очень быстрым. Его необходимо подбирать таким образом, чтобы при кристаллизации эмали не образовывались раковины и трещины. После

обжига эмалевая пленка имеет относительно плотную структуру с незначительной пористостью. Причем поры не сквозные, замыкания между уровнями коммутации не возникает.

Электрические характеристики эмали для межслойной изоляции таковы: сопротивление изоляции (при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) – 10^{14} Ом; диэлектрическая проницаемость (при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $f = 10^3 \dots 10^4$ Гц) – $9 \dots 10$; тангенс угла диэлектрических потерь при тех же условиях не превышает $0,005$; электрическая прочность изоляции при $25\text{ }^{\circ}\text{C} \geq 500$.

Для обеспечения стабильности параметров элементов толсто пленочной схемы применяют покрытия из стеклоэмали и органических композиций, особенно для толсто пленочных схем на основе неблагородных металлов.

Стеклоэмали сушатся на воздухе при температуре $(125 \pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение $5 \dots 15$ мин. Вжигание проводится при температуре $(500 \pm 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ с продолжительностью $4 \dots 6$ мин в области максимальной температуры.

4. Технологический маршрут изготовления многослойных плат микросборок

При разработке и изготовлении микросборок приходится решать: проблему повышения плотности электромонтажа и снижения количества контактов, что приводит к необходимости использования многоуровневой разводки; проблему теплоотвода, которая часто вынуждает использовать хорошо проводящие тепло металлические или керамические подложки. Эти проблемы связаны с тем, что в состав микросборок в качестве навесных компонентов могут входить микросхемы высокой степени интеграции, каждая из которых содержит до нескольких десятков внешних выводов, а количество навесных компонентов в микросборках может составлять десятки и даже сотни.

В зависимости от эксплуатационных требований, объема выпуска и технологических возможностей конкретного предприятия многоуровневые межсоединения на изолирующей подложке могут быть реализованы разными вариантами. Условно эти варианты можно классифицировать по признаку технологического метода, используемого для получения межслойной изоляции, а именно: на полиимидной пленке в комбинации с жестким основанием, на многослойной керамической подложке, на основе анодированного алюминия, а также с применением толсто пленочных слоев на керамической подложке.

Основой МСБ является коммутационная плата, содержащая тонкопленочную или толсто пленочную систему многоуровневой разводки и, в некоторых случаях, резисторы и конденсаторы. К системе пленочных проводников предъявляются следующие требования: удельное сопротивление пленочных проводников $\rho \leq 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, удельная паразитная емкость между слоями $C_0 \leq 5 \text{ пФ/см}^2$. Материал межуровневого диэлектрика должен иметь низкую диэлектрическую проницаемость, высокую электрическую прочность, высокое сопротивление изоляции, хоро-

шую термостойкость, отсутствие пор и трещин, минимальное влагопоглощение.

Толстоленочные коммутационные платы. Толстоленочные многоуровневые межсоединения создают на основе проводниковых и диэлектрических паст путем трафаретной печати и последующего вжигания. Особенности этой технологии обусловлены необходимостью формировать контактные переходы в условиях толстых (нескольких десятков микрон) изолирующих слоев. Поэтому к диэлектрическим пастам для межслойной изоляции предъявляют повышенные требования в отношении уменьшения растекаемости как в процессе трафаретной печати, так и в процессе вжигания (в том числе и при повторных нагревах). Наилучшие результаты дает применение ситаллоцементов.

Кроме того, при этой технологии необходимо наращивать контактные переходы в глубоких окнах межслойной изоляции перед нанесением очередного слоя межсоединений. Такой прием обеспечивает целостность и надежность контактных переходов. Наращивание контактных переходов представляет собой самостоятельную операцию трафаретной печати.

В качестве материала основания толстоленочной коммутационной платы чаще всего выбирают алюмооксидную керамику марки 22ХС.

Технологический процесс формирования многоуровневых межсоединений включает в себя следующие основные этапы (рис. 46):

- 1) нанесение проводников и контактных площадок первого уровня, сушка и вжигание;
- 2) нанесение первого уровня межслойной изоляции с окнами для контактных переходов, сушка и вжигание;
- 3) нанесение проводниковой пасты в окна изолирующего слоя (наращивание переходов) и сушка;
- 4) нанесение проводников и контактных площадок второго уровня, сушка и вжигание совместно с контактными переходами;

5) нанесение второго уровня межслойной изоляции с окнами для контактных переходов, сушка и вжигание и т. д.

Марки проводниковых и диэлектрических паст подбирают таким образом, чтобы необходимая температура вжигания на каждом этапе была ниже, чем на предыдущем. На последнем этапе на контакты верхнего уровня наносят методом трафаретной печати лудящую пасту, которую затем оплавливают и отмывают от флюса в спиртоацетоновой смеси. Таким образом, подготавливают монтаж кристаллов на плате и платы в корпусе.

Для повышения выхода годных изделий применяют двукратную печать материала изолирующего слоя. При этом уменьшаются паразитные емкости за счет увеличения толщины диэлектрика. Плотность толсто пленочного монтажа ограничивается технологическими возможностями формирования соседних отверстий в изолирующем слое для переходов. В процессе создания многоуровневых коммутационных плат могут формироваться также толсто пленочные резисторы и конденсаторы.

Изготовление двухслойных коммутационных плат не содержит существенных трудностей. С увеличением числа слоев плотность межсоединений повышается и возникают трудности, обусловленные необходимостью совмещения применяемых материалов и ограничениями, налагаемыми процессом трафаретной печати. Для изготовления многослойной конструкции требуется большое количество технологических этапов, поэтому совместимость материалов нужно поддерживать на всех этапах вжигания.

Изоляция полиимидным лаком. Многослойный вариант разводки с использованием полиимидного лака на жестком основании включает: формирование первого уровня разводки на основе тонко пленочного слоя меди; создание изолирующего слоя путем нанесения полиимидного лака; формирование окон под контактные переходы; формирование конфигурации элементов второго уровня разводки (рис. 47, а).

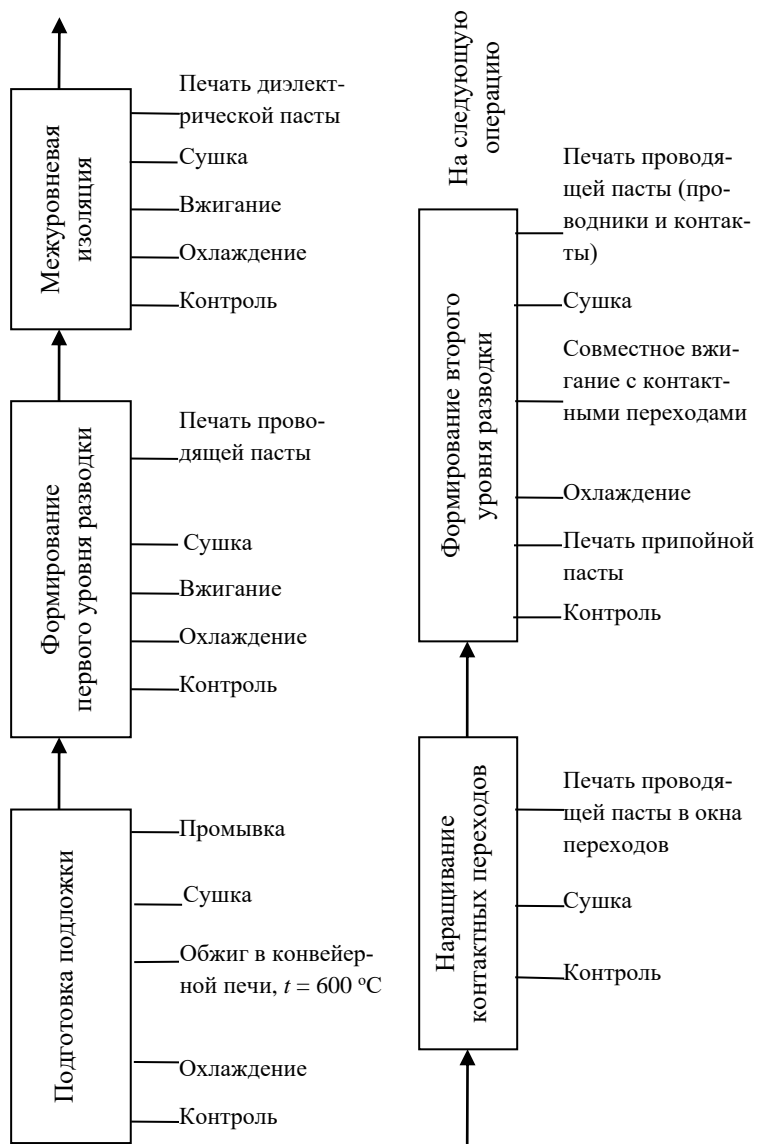
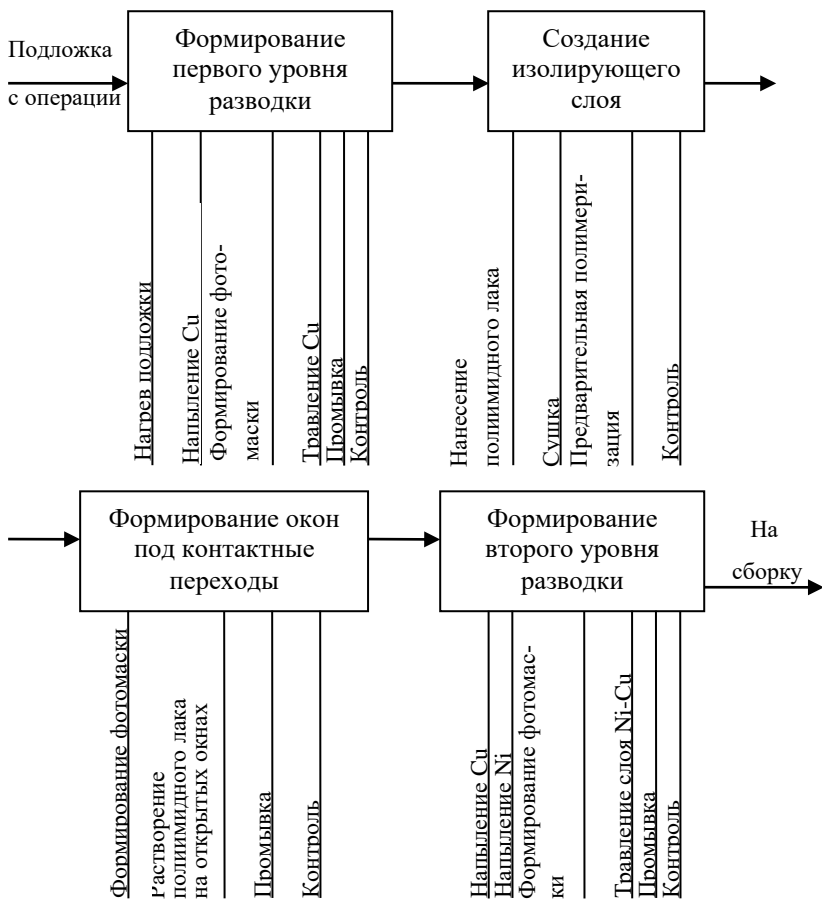
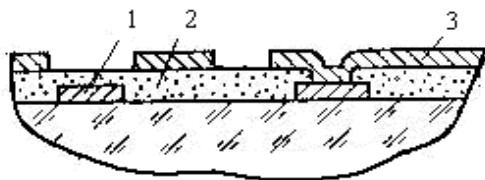


Рис. 46. Технологический маршрут изготовления толстопленочной двухуровневой коммутационной платы



а)



б)

Рис. 47. Технологический маршрут изготовления двухслойной коммутации на основе полиимидного лака: а – последовательность операций;

б – фрагмент межслойной изоляции

На рис. 47, б показан фрагмент межслойной изоляции, полученной с помощью полиимидного лака. Лак 2 наносят методом центрифугирования или пульверизации на первый уровень 1 металлизации, за счет чего достигается эффект грунтовки и выравнивания поверхности перед нанесением второго уровня металлизации. Выбор полиимидного лака (например, ПАК-1) обусловлен устойчивостью получаемой пленки к механическим и температурным (до 400 °С) воздействиям, а также к повышенной влажности. После сушки и предварительной полимеризации лаковая пленка способна растворяться в специально подобранных травителях, не взаимодействующих с нижележащим слоем металла. Толщина нанесенной пленки должна превышать толщину проводников так, чтобы обеспечивалась надежная межуровневая изоляция.

После фотолитографии по лаковой пленке и вскрытия окон под контактные переходы формируют второй уровень 3 межсоединений и т. д.

Технологический маршрут изготовления многослойной разводки на базе полиимидной пленки. Маршруты создания двухслойной разводки с применением полиимидной пленки представлены на рис. 48 и 49. Технологический маршрут изготовления многослойной разводки на основе полиимидной пленки состоит из следующих основных операций: изготовление полиимидных пластин (пленок); формирование межуровневых отверстий; металлизация поверхностей (включая отверстия); формирование конфигураций коммутационных элементов (рис. 48).

Изготовление полиимидных пластин начинают с вырубki заготовок из ленты и создания базовых отверстий для взаимного совмещения. Формирование межуровневых отверстий связано с фотолитографией и двухсторонним травлением полиимидной пластины. Травление полиимидной пленки выполняют одновременно с двух сторон за один фотолитографический цикл, и в ней формируются отверстия $\varnothing 20 \dots 30$ мкм при толщине пленки 25 мкм и $\varnothing 50 \dots 70$ мкм на пленке толщиной 50 мкм; количество отверстий достигает нескольких тысяч при площади подложки 60×48 мм и нескольких десятков тысяч при площади 100×100 и 150×150 мм.

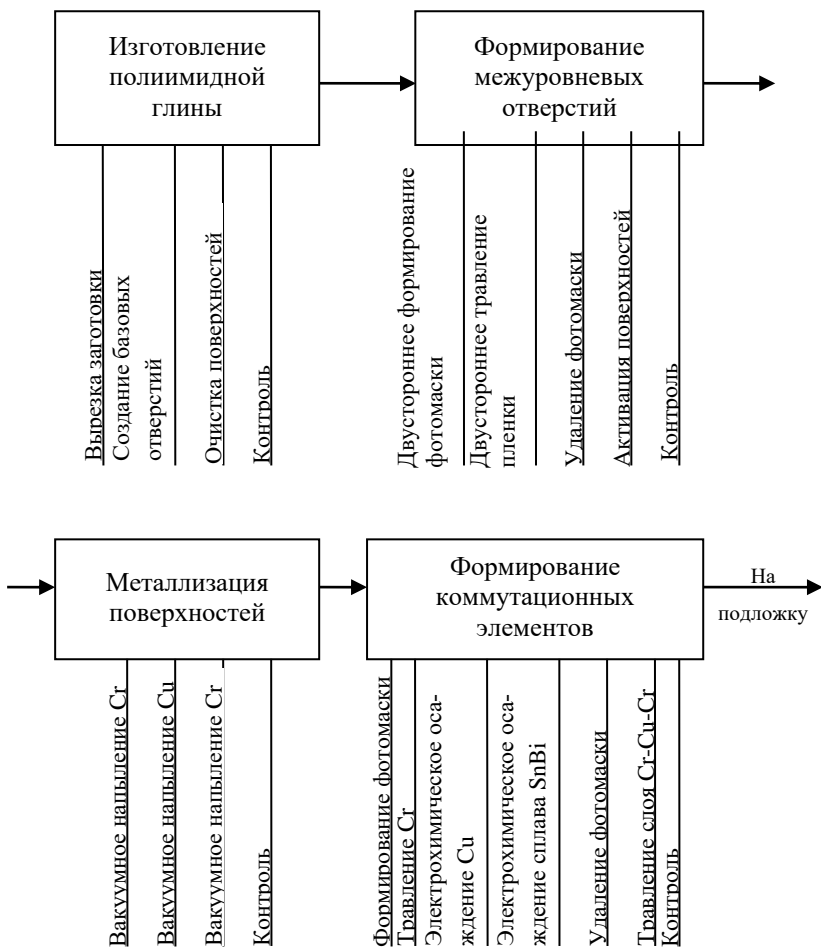


Рис. 48. Технологический маршрут изготовления многослойной разводки на базе полиимидной пленки

При двухстороннем травлении полиимида создается благоприятная для вакуумной металлизации, близкая к конусообразной форма отверстий, а проколы в пленке фоторезиста не вызывают появления лишних отверстий.

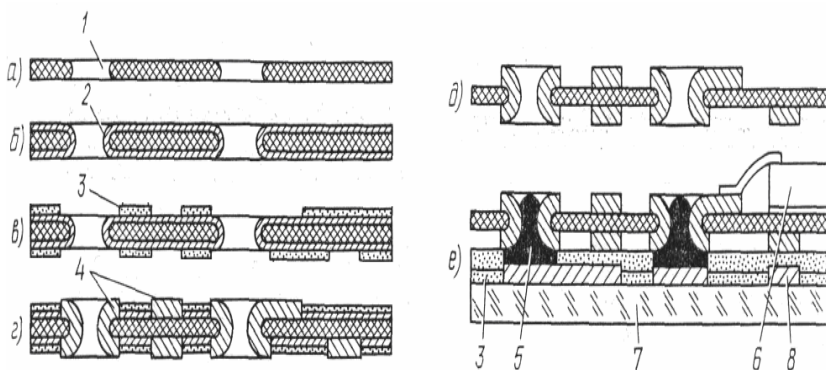


Рис. 49. Фрагменты межслойной изоляции с применением гибкойполиимидной пленки:

- 1 – переходное отверстие в полиимидной пленке; 2 – слой Cr–Cu–Cr;
- 3 – фоторезист; 4 – электролитически осажденные слои меди и сплава Sn–Bi (около 20 мкм); 5 – припой; 6 – кристалл полупроводниковой БИС;
- 7 – сапфировая подложка; 8 – пленочная разводка на сапфировой подложке

После создания системы отверстий (рис. 49, б) на обе стороны полиимидной пленки наносятся термическим испарением в вакууме слои хром – медь – хром с соответствующими толщинами 30 – 1 000 – 30 нм. Двусторонняя металлизация подложек из полиимида осуществляется за один цикл вакуумного нанесения на установках с планетарным вращением подложек.

Перед металлизацией полиимидная пленка подвергается термоотжигу при $T = 200\text{--}250\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 часов в атмосфере инертного газа (аргон, азот). Для получения требуемой адгезии металлических пленок к полиимиду необходима специальная активационная химическая обработка его поверхности в плазме или в щелочи.

Рисунок проводящих (нижнего и верхнего) слоев создается методом двусторонней фотолитографии по фоторезистивной защитной маске (рис. 49, в) и последующего электролитического осаждения меди на незащищенные участки, в том числе в переходных отверстиях (рис. 49, г).

Слой хрома под фоторезистом служит для предотвращения отслаивания защитной фоторезистивной маски при гальваническом осаждении меди. На открытых участках верхний слой хрома до электроосаждения меди удаляется. Суммарная толщина покрытия из меди составляет 15...20 мкм. Это обеспечивает удельное поверхностное сопротивление медной разводки не более 0,001 Ом/кв. Для защиты медной пленки от коррозии в средах с повышенной влажностью на медное покрытие методом гальванического наращивания наносится защитный слой золота или сплава олово – висмут.

Формирование двухслойной разводки на полиимидной пленке завершается удалением защитной маски фоторезиста и травливанием слоев хром – медь – хром с участков, которые ранее были защищены фоторезистом (рис. 49, д). Далее полиимидная пленка с двумя уровнями разводки направляется на сборку.

Для обеспечения необходимой жесткости конструкции и эффективного теплоотвода пленка со сформированной на ней разводкой перед установкой кристаллов ИС, БИС и пассивных компонентов приклеивается к жесткому основанию. Таким жестким основанием может быть ситалл, поликор и, предпочтительнее, алюминиевая подложка. Далее методами сварки или пайки в зависимости от конструкции выводов монтируются кристаллы полупроводниковых ИС и БИС и другие компоненты.

Число уровней разводки можно довести до 10 и более путем наращивания числа полиимидных плат с двухуровневой разводкой и электрически изолированных друг от друга полиимидными платами без разводки, но с переходными отверстиями. Их соединение в единую конструкцию осуществляется методом вакуумной пайки.

Маршрут производства толстоплёночных МСБ с многоуровневой разводкой на многослойной керамической подложке. Изготовление многослойных керамических оснований состоит из нескольких этапов (рис. 50): изготовления керамических пластин; формирования плёночных проводников и переходных отверстий; изготовления многослойной подложки; металлизации верхнего и нижнего слоев.

Из сырой керамики выполняются отдельные слои, в которых для удобства выполнения последующих операций в углах каждого листа пробиваются фиксирующие отверстия, а затем и отверстия для межслойных соединений. Пробивка сквозных отверстий выполняется на быстродействующей многопуансонной перфорационной установке, управляемой ЭВМ. После этого осуществляется контроль качества отверстий и металлизация. Металлические соединения наносятся на сырые листы керамики методом трафаретной печати. Через сетчатый трафарет, на котором нанесен рисунок соединений, продавливается паста на основе молибдена или вольфрама и одновременно заполняет также сквозные отверстия. Ширина проводников составляет 0,12 мм.

Далее металлизированные листы сушатся и проверяются. Выявление дефектов в отдельных листах до того, как из них будет собрана полная подложка, играет очень важную роль в получении высокого процента выхода годных изделий в данном технологическом процессе.

Листы, прошедшие проверку, собираются в определенной последовательности в пакеты и спрессовываются под высоким давлением при температуре 75 °С. Сквозные отверстия должны совпадать в слоях, поэтому точный контроль размеров и совмещений листов крайне необходим. Спрессованная необожженная подложка подгоняется под нужный внешний размер и затем подвергается длительному циклу обжига, во время которого происходит постепенный нагрев до максимальной температуры 1 560 °С в атмосфере водорода. При меньших температурах связующий органический материал разлагается и улетучивается, а при максимальной температуре керамика и металл спекаются в монолитную структуру.



Рис. 50. Технологический маршрут изготовления многослойной керамической подложки

Скорость повышения температуры при нагреве необходимо тщательно контролировать; при слишком высокой скорости органическое связующее вещество будет разлагаться быстрее, чем продукты распада успеют продиффундировать к поверхности, и подложка может расслоиться. Во время спекания все линейные размеры подложки уменьшаются примерно на 17 %, так что ее полный объем становится меньше примерно на 40 %. С учетом того, что размеры окончательного изделия должны быть выдержаны с жесткими допусками, очевидно, степень уменьшения линейных размеров должна быть точно известна при первоначальном нанесении всех рисунков на необожженные листы. После отжига подложка приобретает размеры, форму и твердость керамической плитки.

Открытые участки металлизации на обеих сторонах готовой подложки покрываются сначала никелем, а затем золотом. На автоматической испытательной установке выполняют детальную проверку всех электрических цепей подложки, чтобы убедиться в правильности соединений. При этой проверке также используются результаты работы системы автоматизированного проектирования. Испытательная установка контролирует правильность соединения каждой контактной площадки в соответствии со схемой; кроме того, должно быть установлено отсутствие лишних и неправильных соединений. Сложность процесса предполагает проведение большого количества контрольных операций. Предусмотрен механический, оптический, электрический контроль.

По окончании проверки и исправления дефектов лазерным инструментом заготовки поступают на финишные операции: контактные площадки покрываются припоями для присоединения навесных компонентов.

Технологический маршрут создания многоуровневой разводки с использованием последовательного анодирования напыляемых пленок алюминия представлен на рис. 51 и 52. Особенностью этой технологии является включение операции локального анодного окисления алюминия в специально подобранных электролитах, а также высокая степень планарности коммутационных слоев.

Технологический маршрут создания многоуровневой разводки, показанный на рис. 51, включает следующие основные этапы: металлизация алюминием поверхности диэлектрической подложки в вакууме; формирование первого уровня разводки; формирование межуровневых переходов; металлизация и формирование второго уровня разводки; металлизация и формирование второго уровня разводки; металлизация верхнего (последнего) уровня разводки. Каждый этап сопровождается контролем. Далее подложка поступает на сборку.



Рис. 51. Технологический маршрут формирования трехуровневой разводки на основе последовательного анодирования напыляемых пленок алюминия

После нанесения на изолирующую подложку 2 сплошного слоя алюминия толщиной 1...1,5 мкм формируют фоторезистивную маску 3 на основе позитивного фоторезиста (рис. 52). Рисунок фотомаски должен быть дополняющим по отношению к рисунку будущих проводников первого уровня. При наличии маски анодируют незащищенные участки поверхности алюминия на глубину порядка 0,1 мкм (несквозное анодирование). При этом образуется плотный окисел Al_2O_3 с хорошими электрическими свойствами 4. После удаления фотомаски 3 (рис. 52, в) формируют следующую фоторезистивную маску (рис. 52, г) и производят сквозное анодирование (до подложки) участков алюминия, не защищенных плотным окислом Al_2O_3 . Следует отметить, что электролитическое окисление относительно толстых пленок возможно за счет ухудшения структуры растущей пленки.

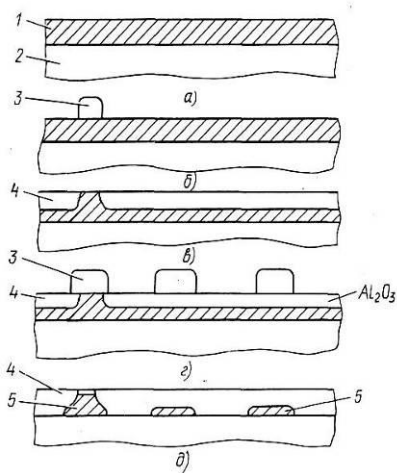


Рис. 52. Фрагменты межслойной изоляции, полученные с помощью анодирования алюминия: а – напыление слоя алюминия; б – нанесение фоторезистивной маски; в – локальное несквозное анодное окисление алюминия; г – нанесение фоторезистивной маски; д – локальное сквозное анодное прокисление алюминия, формирование первого уровня разводки; 1 – пленка Al; 2 – подложка; 3 – фоторезист; 4 – анодный окисел Al_2O_3 ; 5 – первый уровень разводки

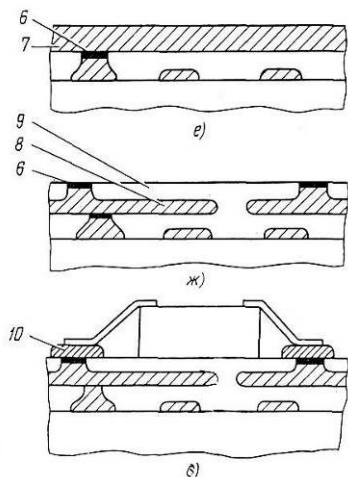


Рис. 52. Фрагменты межслойной изоляции, полученные с помощью анодирования алюминия: е – нанесение пленок никеля, цинка в месте контакта двух уровней разводки и напыление второго слоя алюминия; ж – повторение операций нанесения фоторезистивных масок, несквозного и сквозного анодного окисления пленки алюминия и формирования второго уровня разводки; з – нанесение контактных материалов, формирование третьего уровня разводки, монтаж и сборка навесных компонентов; 6 – контактные материалы Zn, Ni; 7 – второй слой Al; 8 – второй уровень разводки; 9 – второй слой анодного окисла Al_2O_3 ; 10 – третий уровень разводки (Cu, Au)

Далее на полученную структуру наносят фотомаску и методом избирательного травления удаляют участки окисла для создания контактных переходов во второй уровень металлизации. Формирование второго уровня межсоединений начинается с нанесения сплошной пленки алюминия 7 (рис. 52, е) и аналогично формированию первого уровня.

На последнем (верхнем) уровне межсоединений выполняют контактные площадки: для электрического монтажа кристаллов БИС и компонентов, а также для присоединения внешних выводов.

5. Технологические процессы сборки и монтажа микросборок

5.1. Крепление подложек и компонентов

Метод крепления кристаллов и других компонентов на подложку, а также подложек и компонентов на многослойную коммутационную плату МСБ зависит как от типа выводов компонентов, так и от выбора материала присоединительного слоя – клея, стекла, припоя и т. д. По типу выводов компоненты бывают: с гибкими выводами (проволочными и плоскими); с жесткими выводами (шариковыми, столбиковыми и балочными); с лужеными припоем противоположными гранями. При этом материал присоединительного слоя должен обеспечивать эффективный отвод тепла в подложку или общую плату в зависимости от выделяемой мощности, хорошее согласование температурных коэффициентов расширения соединяемых элементов в широком диапазоне рабочих температур (обычно $-60 \div +125$ °С), стойкость к динамическим воздействиям (с ускорением до 150 g) в условиях вибраций и ударов. В отдельных случаях присоединительный слой должен быть электропроводным.

Основными технологическими требованиями к методам крепления являются: простота процесса, отсутствие значительных механических или термических воздействий в процессе соединения, возможность механизации или автоматизации процесса или применения групповых методов обработки, воспроизводимость геометрических параметров соединения, облегчающая процесс последующего присоединения выводов.

Из названных методов присоединительные слои на основе металлических припоев имеют достаточно низкие тепловые сопротивления по сравнению с тепловым сопротивлением спая на основе стекла и клеевых соединений.

При вибрациях, ударах и статических перегрузках на элементы конструкции микросхемы действуют распределенные нагрузки, причем пиковые значения результирующих сил определяются массой элемента и ускорением ($F = ma$). Эти силы в зависимости

от направления стремятся сдвинуть или оторвать элемент. Благодаря малой массе элементы микросхемы (включая подложку) хорошо противостоят действию статических перегрузок и одиночных ударов. Например, при действии ускорения $150 g$ в плоскости керамической подложки размером 30×24 мм сдвиговое усилие имеет значение ~ 40 Н, а соответствующее напряжение в присоединительном слое ~ 60 кПа, что примерно в 100 раз меньше предела прочности на сдвиг (адгезии) для соединений на основе современных клеев (единицы МПа).

Более существенное влияние на прочность соединения оказывают длительные вибрационные воздействия (частота $5 \dots 5\,000$ Гц при ускорениях до $40g$), которые могут привести к усталостным разрушениям в слое. Наименее стойкими к вибрационным воздействиям являются соединения стеклом, обладающие хрупкостью и пониженной прочностью на растяжение.

Процесс крепления подложек и компонентов можно условно представить в виде следующих стадий (рис. 53):

- 1) подготовка поверхности основания и нанесение присоединительного материала (клея, стекла, припоя);
- 2) ориентированная установка компонента (кристалла, пассивного элемента, подложки) на основание;
- 3) собственно присоединение, которое в общем случае выполняется под давлением и с нагревом.

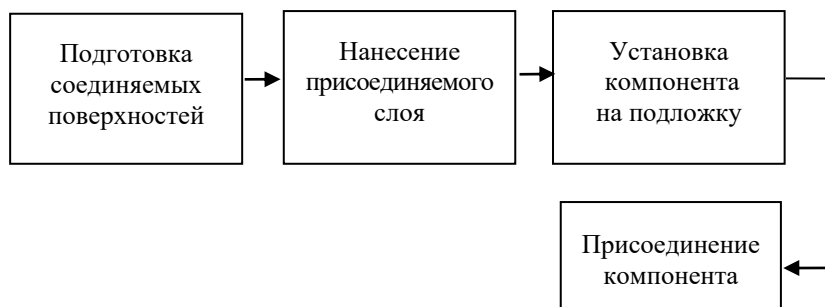


Рис. 53. Последовательность процесса крепления компонента к подложке

Наиболее точным и производительным способом нанесения присоединительного материала, обладающего свойствами пасты (клей, суспензия стекла, лудящая паста), является трафаретный способ, который позволяет обеспечить достаточно точную дозировку присоединительного материала, а следовательно, высокую воспроизводимость геометрических размеров соединения.

Присоединение можно выполнять индивидуально для каждого кристалла и навесного компонента на специальных технологических установках (обычно при соединении пайкой) или групповым способом в кассетах под необходимым давлением с общим нагревом в печах или термостатах (соединения стеклом или склеиванием).

Клеевые соединения. Технология клеевых соединений проста и может применяться для широкого круга материалов (с использованием клеев на эпоксидной основе) и диапазона рабочих температур ($-60 \div +150$ °С). Клеевые соединения используют для микросхем и компонентов пониженной мощности. Преимущество метода – стойкость к вибрациям. Основной недостаток – пониженная теплопроводность.

Клеевые соединения характеризуются наличием внутренних напряжений, которые возникают вследствие первичной усадки при полимеризации (уплотнение структуры), усадки при охлаждении (при горячем отверждении), разницы ТКЛР соединяемых деталей и клея.

При склеивании большинство клеев допускают варьирование температуры и времени в широких пределах, причем при повышении температуры время отверждения клея быстро уменьшается. Режим холодного отверждения осуществляется при комнатной температуре, но требует длительной выдержки (до 48 ч). Поэтому склеивание, как правило, выполняют с подогревом от 60 до 200 °С зависимости от марки клея.

Отечественной промышленностью выпускаются теплопроводящие (марки ЭЧТ, ЭЧВТ и др.), электропроводящие (марки ЭЧЭ-Н, ЭЧЭ-С, ЭК-А и др.) и электропроводящие клеи повышенной влажностойкости (ЭВТ и др.). Токопроводящие клеи представляют собой

композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических смол с добавлением порошков серебра или никеля. Среди них наиболее широкое распространение получили клеи АС-40В,ЭК-А.ЭК-Б, ЭВТ и КН-1, представляющие собой пастообразные жидкости с удельным электрическим сопротивлением 0,01...0,001 Ом·см и диапазоном рабочих температур от –60 до +150 °С. Основные данные по клеям повышенной теплопроводности (в том числе и электропроводящим) для крепления кристаллов приведены в табл. 26.

Таблица 26. Свойства электро- и теплопроводящих клеев

Свойство	Марка клея			
	ЭЧВТ	ЭЧЭ-С	ЭК-А	ЭВТ
Особые свойства	Теплопроводящий	Электропроводящий (наполнитель серебро)	Электропроводящий	Электропроводящий повышенной влагостойкости
Диапазон рабочих температур, °С	–60...+200	–60...+125	–60...+150	–60...+200
Отверждение (при температуре), ч	3(230–250 °С)	5(60 °С)	5(120 °С)	3(230–250 °С)
Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К)	0,008–0,01	0,04–0,06	0,02–0,03	0,04
Удельное объемное сопротивление, Ом/см	–	$(3...4) \cdot 10^{-3}$	$(2...4) \cdot 10^{-3}$	$(2...8) \cdot 10^{-4}$

Качество поверхности соединяемых элементов оказывает большое влияние на прочность клеевого слоя. Поэтому с поверхности перед склеиванием тщательно удаляют загрязнения и жировые пленки, причем следы используемых органических растворителей должны быть полностью удалены сушкой.

При отверждении клея остаточный растворитель создает пористость и внутренние напряжения, снижающие прочность слоя. Для удаления растворителей, входящих в состав клея, производят сушку на воздухе в течение 1–1,5 ч, после чего проводят термообработку в соответствии с выбранным режимом отверждения.

Прочность клеевого слоя в объеме зависит от совершенства структуры полимера. Количество дефектов увеличивается с толщиной слоя, и прочность соединения падает. Рекомендуется слой ограничивать толщиной 0,05–0,1 мм.

На рис. 54 показано крепление компонентов с помощью клея.

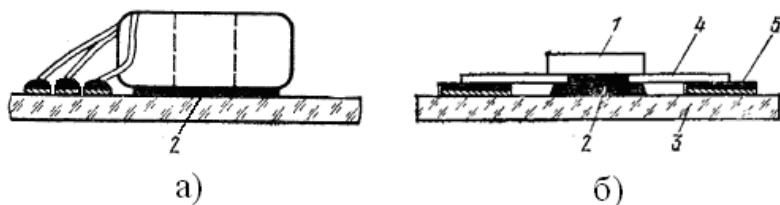


Рис. 54. Клеевое крепление:

а – трансформатора; б – компонента 1 с балочными выводами 4
(2 – клей, 3 – подложка, 5 – контактные площадки)

Крепление компонента 1 выполняют приклеиванием его рабочей стороны клеем 2 к подложке 3 и последующей групповой сваркой балочных выводов 4 с контактными площадками 5.

Широкое применение для крепления подложек гибридных микросхем к базовой коммутационной плате или к основанию корпуса нашли пленочные клеи (в частности, МПФ-1), которые представляют собой незаполимеризованный подсушенный клей,

который можно разрезать на заготовки нужных размеров и формы. Непосредственно перед монтажом для активации поверхности заготовки пленочного клея ее погружают на 1–2 с в этиловый спирт. Далее установленные пленку и подложку помещают в прижимное приспособление, где выдерживают 1–2 мин. После сушки на воздухе не менее 30 мин изделие подвергают термообработке в термостате (подъем температуры до 150 °С в течение 1 ч, выдержка 2 ч, охлаждение вместе с термостатом до 30–40 °С).

Пайка стеклами позволяет достичь хорошего согласования соединяемых материалов по ТКР, так как, варьируя состав стекла, можно изменять его ТКР в широких пределах. К легкоплавким стеклам относят обычно стекла, температура размягчения которых не превышает 550 °С. Такие стекла имеют более высокий ТКР (С84-1, С88-1, С89-3, С90-1, для которых α соответственно равны 8,4, 8,8, 8,9 и $9,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$). Для часто используемых сочетаний материалов «ковар – ситалл, поликор, кремний» требуются стекла с ТКР порядка $(5 \div 7) \cdot 10^{-6} K^{-1}$, т. е. тугоплавкие (например, С-50).

Пайку стеклом в основном применяют для крепления керамических, поликоровых и ситалловых подложек. Наилучшая адгезия стекла и, следовательно, прочность соединения обеспечиваются с материалами, представляющими собой смеси окислов (ситалл, поликор, керамика 22ХС), или с металлами, имеющими на поверхности прочный слой окисла.

Технология пайки стеклом сводится к нанесению суспензии (пасты) стеклянного порошка в деионизованной воде на очищенную поверхность, сжатую соединенных деталей в приспособлении-кассете, сушке и последующему оплавлению в печи в контролируемой атмосфере.

Пайка металлическими сплавами обеспечивает высокую электропроводность соединения, механическую прочность, хорошее согласование по ТКР. Благодаря высокой теплопроводности и малой теплоемкости металлических сплавов необходимое время

для плавления и получения соединения достаточно мало, что делает целесообразным выполнение этих операций на специальных установках последовательного присоединения компонентов с высоким уровнем механизации и автоматизации. Особенностью процесса пайки является то, что припой (присоединяемый слой) при образовании паяного соединения находится в жидком состоянии, а соединяемые поверхности элементов – в твердом.

Сущность процесса пайки состоит в следующем. Если между соединительными элементами поместить припой и нагреть до температуры плавления припоя, то происходят следующие физические процессы: сначала расплавленный припой смачивает поверхности соединяемых элементов, а далее в смоченных местах происходят процессы межатомного взаимодействия между припоем и каждым из двух смоченных им материалов. После охлаждения припой переходит в твердое состояние. При этом образуется прочное паяное соединение между исходными материалами и припоем.

В качестве присоединительного слоя могут быть использованы мягкие припои, такие как Au–Sn (80 и 20 %; $t_{пл} = 280$ °С); Pb–Sn–Ag (92; 5,5 и 2,5 %; $t_{пл} = 300$ °С). Припой вводят в место соединения в виде фольговых дисков или наносят в виде пасты трафаретным способом. Необходимым условием качественного соединения является высокая смачиваемость соединяемых поверхностей припоем. Для этого компоненты на установочной плоскости должны иметь слой металлизации (золото, серебро или никель с подслоем хрома). Соответственно, площадка для установки компонента на подложку (на основание корпуса, на базовую коммутационную плату) должна иметь никелевое или золотое покрытие (рис. 55).

Кристалл крепится к подложке тыльной стороной с помощью припоя, после чего гибкие выводы изгибаются таким образом, чтобы они касались контактных площадок для микросварки. Крепление компонента с лужеными припоем противоположными

гранями (рис. 55, б) выполняют одновременным креплением к подложке и электрическим соединением с контактными площадками напылом припоя.

Пайка мягкими припоями допускает при необходимости демонтаж припаянного полупроводникового кристалла. В то же время относительно низкая температура плавления припоя ограничивает технологическую температуру на последующих операциях присоединения выводов и герметизации микросхемы.

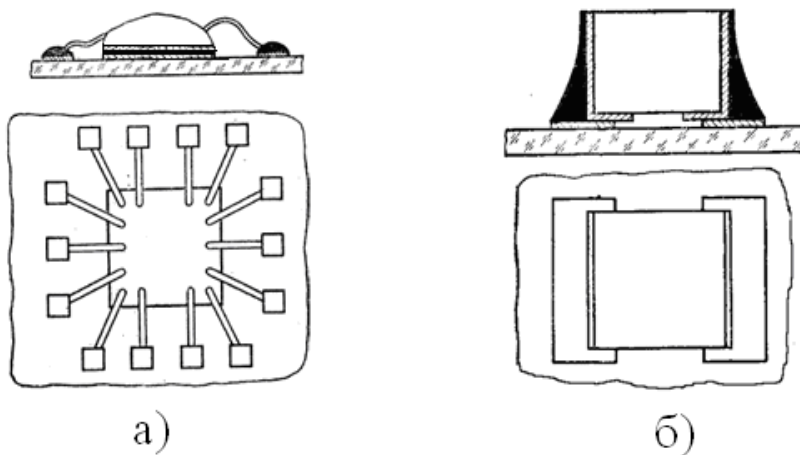


Рис. 55. Крепление компонентов к подложке при помощи припоев:
а – полупроводниковой микросхемы; б – конденсатора

Более высокую температуру плавления ($370\text{ }^{\circ}\text{C}$) имеет эвтектический сплав Au-Si (94 и 6 %), который также в виде фольгового диска помещают между кристаллом и основанием. Рабочую температуру устанавливают в пределах $390\text{--}420\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. выше температуры эвтектики. Время пайки 3–5 с, давление инструмента $1\text{--}3\text{ Н/мм}^2$.

При пайке любыми эвтектическими сплавами температура плавления сплава невысокая (наименьшая для данной системы). Кристаллизация происходит одновременно по всему объему, т. е.

скачкообразный переход из жидкой фазы в твердую обеспечивает мелкозернистость структуры слоя и, следовательно, повышенную прочность.

5.2. Присоединение выводов компонентов

Монтажные операции, связанные с присоединением выводов, осуществляют, во-первых, для создания внутрисхемных электрических соединений при монтаже кристаллов и других навесных элементов на подложках гибридных пленочных микросхем и микросборок; во-вторых, для коммутации периферийных контактов гибридных микросхем и микросборок с внешними выводами корпуса. Соединение может быть выполнено с помощью перемычки или непосредственно. Выводы компонентов можно присоединять пайкой или микросваркой.

С помощью пайки получают ремонтпригодные соединения, т. е. такие, которые можно демонтировать и перепаять без повреждения коммутируемых элементов. Инструменты, применяемые при пайке, достаточно просты. В то же время паяное соединение характеризуется относительно большой площадью, а сам процесс – низкой производительностью; возможно растворение материала перемычек и пленочных контактов в расплавленном припое; воспроизводимость параметров соединения невысока.

При микросварке соединение может быть получено за счет плавления или давления. Наиболее широко применяют различные разновидности микросварки давлением, при которых соединение формируется в твердой фазе за счет сжатия поверхностей и нагрева. Это обусловлено возможностью управления параметрами процесса, его механизации и автоматизации, высоким качеством и воспроизводимостью параметров соединения. При микросварке давлением форма и размеры сварной точки строго предопределены рабочей частью инструмента и площадь получаемого соединения минимальна.

В качестве перемычек используют проволоку круглого сечения из золота или алюминия или ленту (прямоугольного сечения) из алюминия. Золотая проволока марки Зл 999,9 имеет диаметр 25–60 мкм и относительное удлинение свыше 10 %. Недостатками такой проволоки являются высокая стоимость, большой удельный вес, снижающий стойкость к вибрациям и ударным нагрузкам, невысокое сопротивление разрыву (для отожженной проволоки ~ 120 Н/мм²) и возможность образования с алюминием хрупких и пористых соединений типа Al_nAu_m .

Использование перемычек из чистого алюминия марки А 995 также ограничено из-за невысокой прочности (для мягкой проволоки ~ 75 Н/мм²), что вынуждает увеличивать диаметр проволоки до 100 мкм и приводит к увеличению площади проектируемых контактов. Лучшие характеристики имеет проволока из алюминий-кремниевый сплав А999К09 и АК09П и алюминий-магниевого сплава АМг08, прочность которых в отожженном состоянии достигает 450 Н/мм³ при относительном удлинении до 4 %. Проволоку выпускают в диапазоне диаметров 27–50 мкм. Проволока марки АК09П («прецизионная») имеет допуск на диаметр ± 1 мкм и повышенную равномерность механических свойств по длине.

Ленточные выводы изготавливают из алюминиевой фольги, например марки А-7 толщиной 40 мкм.

Применение проволоки круглого сечения позволяет механизировать ее подачу в зону сварки путем сматывания с катушки. Ленточные выводы требуют более сложной ориентации перед сваркой, поэтому их применение может быть эффективно только при условии группового изготовления выводов в общем ленточном носителе, их групповой ориентации относительно системы контактов.

Контактные площадки чаще всего выполняют из золота Зл 999,9, алюминия А 99, серебра Ср 999,9, никеля Нвк. Золото и никель применяют также в качестве покрытий для внешних выводов (выводов корпуса).

Качество и надежность получаемых соединений зависит не только от правильно выбранного сочетания свариваемых материалов, но и от качества подготовки их поверхностей. Различные загрязнения и химические пленки на поверхности ухудшают контакт и взаимную диффузию материалов. Для алюминия, который на воздухе быстро покрывается тонкой пленкой окисла, применяют специальный вид сварки давлением – ультразвуковую сварку, в процессе которой происходит разрушение окисной пленки и обнажение чистой поверхности.

В зависимости от материалов вывода и контактной площадки применяют термокомпрессионную сварку (ТКС), сварку с косвенным импульсным нагревом (СКИН), электроконтактную одностороннюю сварку (ЭКОС) сдвоенным инструментом и ультразвуковую сварку (УЗС).

Свариваемость материалов при различных методах микросварки представлена в табл. 27, где ++ свариваются хорошо; + свариваются удовлетворительно; – не свариваются.

Таблица 27. Свариваемость материалов при различных методах сварки

Материал контактной площадки	Метод сварки и материалы выводов											
	ТКС			СКИН			ЭКОС			УЗС		
	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu	Au	Al	Cu
Au с подслоем никрома	++	+	–	++	++	+	++	–	++	++	++	+
Cu или Ni с подслоем никрома	++	+	–	++	+	+	++	–	+	++	+	+
Al	++	+	–	+	+	–	+	–	+	+	++	–

Присоединение выводов пайкой. Соединение пайкой предполагает участие третьего металла в жидком состоянии, который смачивает соединяемые металлы и при затвердевании образует металлическую связь.

Основным условием создания паяного соединения является взаимодействие жидкого припоя с поверхностью чистых соединяемых металлов. Смачивание является непременным условием образования паяного соединения. Степень смачивания и растекания зависит от вида контактирующих металлов, состояния поверхности (наличие окислов, шероховатость), а также условий пайки (температура, газовая среда, продолжительность пайки).

При смачивании припоем возникает взаимодействие, приводящее при затвердевании к образованию связи между кристаллитами. Могут наблюдаться три вида этой связи: растворением, химическим взаимодействием, образованием металлических связей. Взаимодействие растворением следует избегать при пайке к тонким пленкам, это может вызвать растворение всей пленки в припое. С этой точки зрения для пайки предпочтительны не золотые контактные площадки, а медные. Золотая пленка толщиной до 50 мкм полностью растворяется в припое ПСК. Уменьшение опасности растворения достигается предварительным введением в припой присадки (2–3 %) того металла, из которого состоит пленка.

Припой ПОС-61 имеет наименьшую пористость, наилучшие капиллярные свойства из припоев ПОС. Если возможно растворение материала контактной площадки в олове, используют модифицированный припой ПСрОС-3-58 (олово 57,8 масс. %, серебро 3 масс. %, сурьма 0,5 масс. %, свинец – остальное). Для компонентов, чувствительных к перегреву, применяют припой ПОСК-50 с температурой плавления 142–145 °С (олово 49–51 масс. %, кадмий 17–19 масс. %, сурьма 0,2 масс. %, медь 0,008 масс. %, свинец – остальное), а также тройной оловянно-свинцово-индиевый припой (олово 37,5 %, свинец 37,5 %, индий

25 %) с температурой плавления 135 °С. Пайка индиевым припоем дает меньшую прочность на отрыв, но зато обеспечивает хорошую стабильность.

Флюсы, применяемые при пайке, не только растворяют окислы на поверхности твердого металла, но и уменьшают поверхностное натяжение припоев, способствуют улучшению смачивания и растекания, передаче тепла на всю зону пайки. Флюсы должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) растворять очень тонкую окисную пленку;
- 2) защищать от окисления во время пайки;
- 3) смачивать поверхности основного металла и жидкого припоя и понижать поверхностное натяжение припоя (что облегчает его растекание по площади паяного шва);
- 4) выравнивать передачу тепла в зоне пайки;
- 5) остаток флюса и продукты его разложения должны переходить на поверхность припоя, как только припой образует сплав с основным металлом, и легко удаляться после пайки;
- 6) при разложении флюса не должно образовываться газов, разрушающих соседние поверхности.

Наиболее распространен канифольный флюс, применяемый в виде 30 %-ного спиртового раствора. При нагревании во время пайки канифоль разлагается, выделяя абиетиновую кислоту (C₂₀H₃₀O₂), которая растворяет следы окислов в зоне пайки. Флюсы марки ФКСп (канифоль 10–60 масс. %, этиловый спирт 90–40 масс.%) и ФПЭт (полиэфирная смола 15–20 масс. %, метилэтилкетон или этилацетат 85–80 масс. %) не требуют последующей отмывки.

Для присоединения выводов в тонкопленочных ГИСи микросборках используется несколько способов пайки:

- пайка ручным паяльником с дозировкой припоя;
- пайка импульсным нагревом с дозировкой припоя или при предварительном лужении;
- пайка сдвоенным электродом луженых проводников.

При пайке существенное влияние на качество соединений оказывают припой, флюс и длительность пайки, особенно в случае круглых и плоских проводников. Получить высокое качество паяных соединений золотой проволоки диаметром 25–50 мкм с золотой пленкой с применением обычных паяльников не удастся из-за очень быстрого растворения золота в припое.

Такие соединения можно качественно паять только с применением импульсного нагрева. Однако даже в этом случае толщина золотой пленки на нихrome должна быть не менее 1 000 ангстрем. Более тонкие пленки полностью растворяются припоем, и соединение получается низкого качества.

Для пайки компонентов (например, бескорпусных транзисторов с тонкими золотыми выводами) и соединительных проводников в тонкопленочных гибридных схемах можно с успехом использовать импульсно-нагреваемые паяльники. Пайка осуществляется путем пропускания импульса тока через виток спирали. Длительность импульса регулируется с помощью реле времени.

Выполнение последовательности операций при пайке паяльником с импульсным нагревом (табл. 28) возможно в двух вариантах (рис. 56 и 57): залуженный проводник устанавливают на облуженную контактную площадку, предварительно нанеся кисточкой флюс (рис. 56). Можно производить пайку и без лужения контактных площадок (рис. 57). В этом случае на контактную площадку устанавливают таблетку припоя и приклеивают ее флюсом, а затем на припой помещают проводник. Проводник прижимают наконечником паяльника к подложке и включают импульс тока. Длительность нагрева может колебаться в пределах 0,1–3 сек. Наконечник паяльника отводят от проводника только после полного затвердевания припоя. Финишной операцией является удаление остатков флюса растворителем.

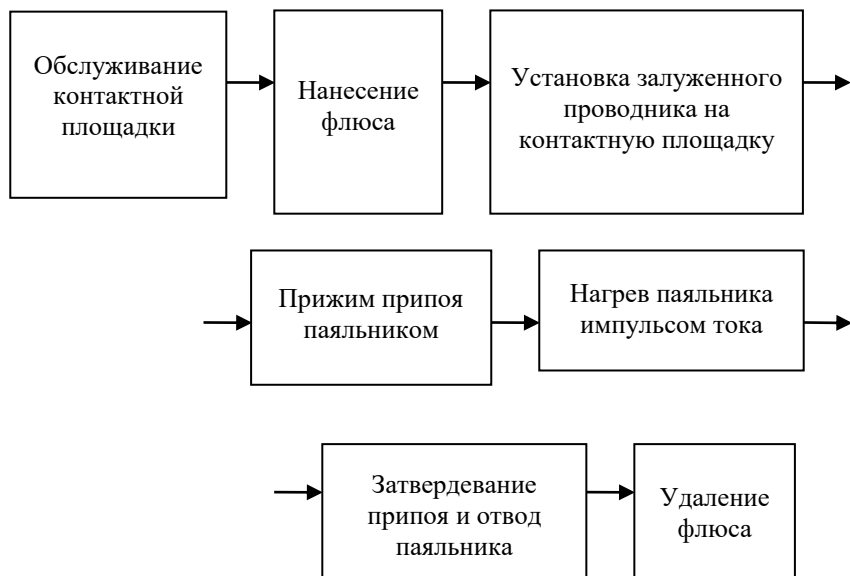


Рис. 56. Последовательность операций при пайке контактов импульсным паяльником (вариант 1)

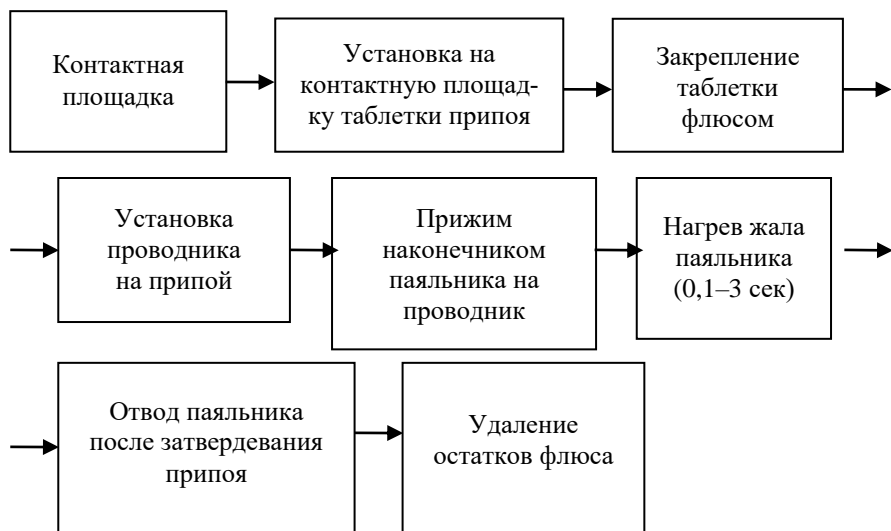


Рис. 57. Последовательность операций при пайке контактов импульсным паяльником (вариант 2)

Таблица 28. Технологические характеристики пайки импульсным нагревом

Материал контактных площадок	Материал выводов				
	Ni	Au	Cu	Ag	Медь луженная
Золотая пленка с подслоем никрома на ситалле	+	+++	++	++	++
Медная пленка с подслоем хрома на ситалле	+	++	+	+	++
Пленка нихром-медь-никель на ситалле	+	+++	+	+	+

Пайка выводов к пленке может осуществляться либо индивидуально, локальным нагревом каждого контактного узла, либо групповым методом – все узлы сразу. В первом случае используется миниатюрный паяльник на напряжение 6 В. Температура жала управляется терморпарой и подогревателем, расположенными внутри жала, и поддерживается на 10–20 °С выше температуры плавления припоя. Пайку выполняют под бинокулярным микроскопом. Таким способом возможно присоединение проволочных выводов диаметром 25–50 мкм из золота, меди, золоченого ковара к пленкам Al, Ag, Cu.

Для группового метода пайки необходимо применять навесные элементы с шариковыми или балочными выводами (рис. 54, б) (например, конденсаторы К-10-9-М размером 1×2×2 мм и емкостью до 0,1 мкФ).

В гибридных пленочных микроплатах невысокой степени интеграции, а также малой плотности рисунка межсоединения и контактные площадки, выполненные из меди, могут подвергаться групповому лужению методом погружения в расплавленный припой. В толстопленочных микросхемах припой может быть нанесен через сетчатый трафарет в виде специальной лудящей пасты, представляющей собой мелкодисперсный порошок припоя с технологической связкой-флюсом. Нанесенную пасту оплавляют в электрошкафах, остатки связки удаляют в спирто-ацетоновой смеси. Трафаретная печать позволяет наносить припой избирательно и в минимально необходимом количестве, что предотвращает растекание припоя при последующей пайке.

Пайку общим нагревом производят в конвейерных установках (например, УП-2) с регулируемой скоростью движения изделий до 50 мм/с. Для исключения операций флюсования и последующей отмычки флюса пайку целесообразно выполнять в защитной (аргон, азот) или защитно-восстановительной (смесь азота и водорода) среде.

Когда компоненты имеют гибкие проволочные выводы, производительность пайки снижается, так как в этом случае требуется предварительная разводка выводов на контактные площадки. Для выполнения пайки могут быть использованы сварочные установки с импульсным косвенным нагревом или с расщепленным электродом, или аналогичные ручные инструменты (микрорпаяльники).

Термокомпрессионная сварка. При термокомпрессионной сварке соединение образуется в твердой фазе в результате нагрева и сжатия соединяемых поверхностей. Пластическая деформация, возникающая в зоне контакта, способствует вытеснению адсорбированных газов и остаточных загрязнений с контактных поверхностей. В результате обнажения чистых поверхностей становится возможным электронное взаимодействие соединяемых материалов, т. е. образование межатомных связей. Получению прочного соединения способствует также ограниченная взаимная диффузия

материалов и образование твердых растворов в тонкой приграничной области.

Теплоту в зону сварки подводят путем нагрева рабочего столика, на котором расположено изделие, или инструмента, или одновременно столика и инструмента. Конкретный вариант устанавливается экспериментально с учетом теплофизических особенностей изделия.

На рис. 58 показаны различные варианты образования соединений методом термокомпрессионной сварки.

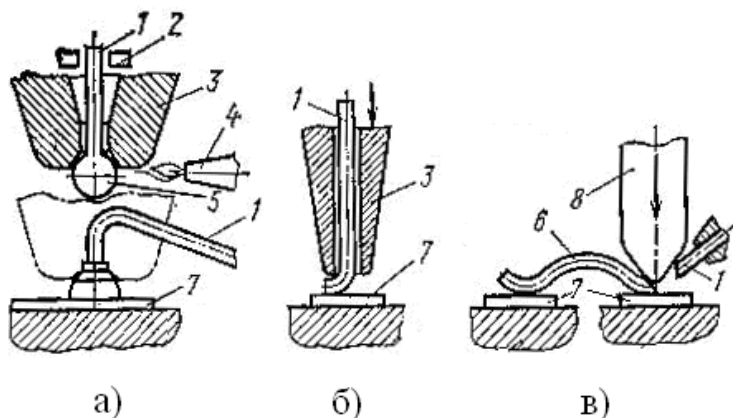


Рис. 58. Разновидности термокомпрессионной сварки:
а – шариком; б – сшиванием; в – клином (1 – проволока;
2 – зажимное устройство; 3 – капилляр; 4 – горелка;
5 – шарик; 6 – перемычка; 7 – контактная площадка)

Режим термокомпрессионной сварки характеризуется следующими параметрами:

1) Температурой нагрева, обычно равной температуре отжига более пластичного из свариваемых материалов. Температура нагрева не должна превышать температуры эвтектики этих материалов во избежание образования жидкой фазы.

2) Давлением инструмента, которое должно обеспечивать деформацию проволоки после ее нагрева в пределах 25–75 %. При этом прочность соединения должна составлять не менее 40–50 % прочности проволоки на разрыв в исходном состоянии. Обычно требуемое давление составляет порядка 100 МПа (100 Н/мм²).

3) Временем воздействия температуры и давления, необходимым для завершения процесса «схватывания» материала. По существу, время выдержки определяется временем приложения давления со стороны инструмента, которое устанавливается в пределах 0,5–10 сек.

Условиями для получения качественного сварного соединения методом термокомпрессии являются высокие пластичность проволоки и взаимная диффузия в твердой фазе свариваемых материалов. В соответствии с этим предпочтительными материалами для перемычек являются золото и алюминий. При сварке Au с Al в результате взаимной диффузии и нагрева возможно образование интерметаллических соединений (AuAl₂, Au₂Al, Au₅Al и др.).

Установки термокомпрессионной сварки предусматривают автоматизацию всех элементов технологического цикла сварки (в пределах одного сварного соединения). Переход от одной сварной точки к другой выполняется вручную (с помощью манипулятора), а совмещение – визуально с использованием бинокулярного микроскопа. На практике используют установку термокомпрессионной сварки марки ЭМ-439М и автоматической установки термокомпрессионной сварки ЭМ-490.

Сварка с косвенным импульсным нагревом. Этот вид микросварки отличается от компрессионной тем, что разогрев рабочей зоны осуществляется только в момент сварки импульсом тока, проходящего непосредственно через инструмент, после приложения давления. Специальная V-образная конструкция инструмента (рис. 59) дает возможность сосредоточить выделяющуюся теплоту, передаваемую соединяемым элементам, на его торцевой (рабочей) части.

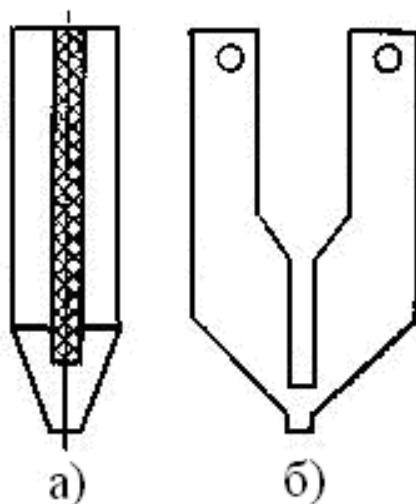


Рис. 59. V-образный инструмент для сварки с косвенным импульсным нагревом:
а – конусный; б – плоский

Сопротивление деформации проволоки при этом падает, под действием приложенного давления происходит осадка металлического проводника и образование соединения.

Локализация нагрева в зоне соединения существенно уменьшает тепловое воздействие на изделие в целом и позволяет сваривать менее пластичные материалы (например, медь).

В отличие от термокомпрессии процесс взаимной диффузии при сварке с косвенным импульсным нагревом играет более существенную роль в обеспечении прочности соединения.

Основными параметрами процесса являются давление и температура нагрева инструмента, а также длительность импульса нагрева.

Для точного дозирования энергии, подводимой в зону сварки, и уменьшения инерционности процесса используют амплитудно-модулированный импульс тока с несущей частотой от 0,5 до 1,5

кГц. Устройство автоматической стабилизации обеспечивает точность температуры торца инструмента в пределах $\pm(2-5)$ °С.

Инструменты изготавливают из ниобиевых теплостойких сплавов (стойкость до 6 000 сварных точек) или из твердых сплавов (до 40 000 сварных точек).

Электроконтактная односторонняя сварка сдвоенным (расщепленным) инструментом. Сварка сдвоенным электродом является разновидностью контактной точечной электросварки, приспособленной к особенностям соединений в микросхемах. Эти особенности предопределяют одностороннее расположение электродов и объединение их в жесткую конструкцию с электроизоляционной прослойкой (рис. 60).

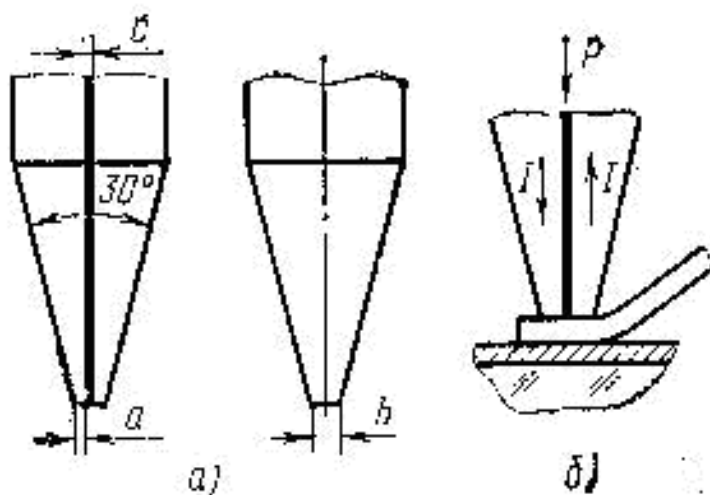


Рис. 60. Инструмент (а) и схема сварки (б) сдвоенным электродом

В зависимости от диаметра проволоки для перемычки (30–150 мкм) длина торца (а) каждого электрода составляет 20–100 мкм, ширина (b) – 80–600 мкм, толщина прокладки (с) – 30–220 мкм. Электроды могут быть выполнены из вольфрама, молибдена

или твердого сплава ВК8. Последний имеет наибольшее применение вследствие высокой стойкости (30–40 тыс. сварок). Материал прокладки – слюда, синтетический корунд и др. Относительно большие размеры инструмента позволяют сваривать круглые и плоские перемычки диаметром (толщиной) до 250 мкм, но требуют при этом соответствующего увеличения контактных площадок.

В процессе сварки перемычка на участке под инструментом является составной частью электрической цепи. Место соединения разогревается за счет тока I и выделения теплоты в месте контакта «перемычка – электроды». Воспроизводимость качества соединения существенно зависит от повторяемости значения электрического сопротивления в месте контакта. Поэтому сварочное оборудование имеет автоматическое регулирование усилия сжатия (3–10 Н) по заданному контактному сопротивлению. Кроме того, целесообразно импульсное воздействие давления: давление включается в момент нагрева почти до максимальной температуры и снимается перед выключением нагревающего импульса тока. Частотное заполнение импульса тока (600–1 000 Гц) и модуляция тока по амплитуде позволяют обеспечить предварительный постепенный прогрев зоны сварки в начале цикла, что исключает тепловой удар на контактную площадку и отжиг материала в сварной точке в конце цикла.

Ультразвуковая сварка. При ультразвуковой сварке соединение металлов в твердой фазе осуществляется путем возбуждения в них упругих колебаний ультразвуковой частоты с одновременным приложением давления.

При подключении обмотки возбуждения к УЗ-генератору (рис. 61) электрические колебания с помощью преобразователя (обычно магнитострикционного) трансформируются в продольные механические колебания, которые с помощью волновода-концентратора усиливаются по амплитуде (до 0,5–2 мкм) и через сварочный инструмент передаются соединяемым деталям.

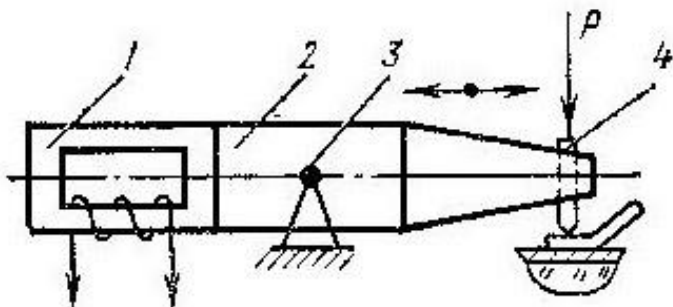


Рис. 61. Схема ультразвуковой сварки: 1 – преобразователь;
2 – волновод-концентратор; 3 – акустическая развязка;
4 – сварочный инструмент

В результате в материале деталей возникают сложные напряжения растяжения, сжатия и среза, превышающие предел упругости. Пластические деформации появляются прежде всего в зоне контакта, где за счет трения выделяется теплота, а имеющиеся на границе раздела окисные пленки разрушаются, обнажая чистые поверхности.

Эти особенности процесса имеют ряд важных следствий. Во-первых, пластические деформации в зоне контакта достигаются без специального подвода теплоты. Во-вторых, можно получать прочные соединения без значительной объемной деформации перемычки, что позволяет уменьшить размеры проектируемых контактных площадок. В-третьих, большая роль поверхностного электронного взаимодействия в обеспечении прочности соединения дает возможность соединять трудно-свариваемые материалы.

Для повышения качества соединения и сокращения времени процесса на практике ультразвуковую сварку обычно сочетают с импульсным косвенным нагревом инструмента (иногда нагревают все изделие). В этом случае сначала сварочный инструмент прижимают к свариваемым деталям, затем подают импульс тока, нагревающий инструмент, и одновременно (или с небольшим опе-

режением или запаздыванием) включают ультразвуковые колебания. Импульс УЗ-колебаний должен завершиться до окончания импульса тока нагрева. Таким образом, основными параметрами УЗ-сварки являются: амплитуда и частота УЗ-колебаний (0,5–2 мкм и 20–60 кГц); приложенное давление (20–150 Н/мм²); длительность сварки, определяемая длительностью импульса нагрева.

В табл. 29 приведены оценки свариваемости некоторых сочетаний материалов ультразвуком, где +++ свариваются очень хорошо, ++ свариваются хорошо, + свариваются удовлетворительно, – свариваются плохо.

Таблица 29. Свариваемость материалов ультразвуком

Материал пленки и подложки	Материал микропроводов			
	Au	Al	Cu	Медь золоченая
Золото с подслоем никрома	+++	+++	+	++
Алюминий	++	++	–	–
Медь с подслоем никрома	++	++	+	+

В производстве изделий микроэлектроники для ультразвуковой сварки применяют установки УЗСКН-1 и ЭМ-423 М. Инструмент для УЗ-сварки алюминиевой проволоки изготавливают из металлокерамических сплавов марок ВК6М и ВК3М (стойкость до 30 тыс. сварок).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бондаренко, О. Е. Конструктивно-технологические основы обеспечения качества микросборок / О. Е. Бондаренко, Л. М. Федотов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231 с.
2. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – Москва: Лань, 2006. – 400 с.
3. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок. / Л. А. Коледов – Москва: Радио и связь, 1989. – 400 с.
4. Парфенов, О. Д. Технология микросхем / О. Д. Парфенов. – Москва: Высшая школа, 1986. – 320 с.
5. Пиганов, М. Н. Материалы гибридных микросхем и микросборок / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 2004. – 204 с.
6. Пиганов, М. Н. Технологические основы обеспечения качества микросборок / М. Н. Пиганов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231 с.