

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)

М.П. КАЛАЕВ, А.М. ТЕЛЕГИН

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МИКРОСБОРОК И ГИБРИДНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

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 основной образовательной программе высшего образования по направлениям подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств

САМАРА
Издательство Самарского университета
2020

УДК 621.382.049.76(075)

ББК 32.844я7

К170

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

Калаев, Михаил Павлович

К170 Технология и конструирование микросборок и гибридных функциональных устройств: учебное пособие / М.П. Калаев, А.М. Телегин. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 100 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1583-6

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 621.382.049.76(075)

ББК 32.844я7

ISBN 978-5-7883-1583-6

© Самарский университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Основные определения, классификация микросборок.....	7
2. Материалы для микросборок.....	23
2.1. Материалы для подложек МСБ.....	23
2.2. Резистивные материалы.....	40
3. Технология изготовления тонкопленочных элементов...	42
3.1. Процесс осаждения.....	42
3.2. Условия термовакuumного напыления.....	44
3.3. Испарители для термического вакуумного напыления.....	48
3.4. Технологические процессы с использованием нихрома.....	57
3.5. Технологические процессы на основе пленок нитрида тантала.....	70
3.6. Металлокерамические тонкопленочные резисторы.....	72
4. Фоторезисты и их технологические процессы.....	74
5. Многокристалльные модули.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных задач совершенствования техники монтажа микроэлектронной аппаратуры (МЭА) являются увеличение плотности упаковки элементов и компонентов, снижение материалоемкости (а следовательно, снижения габаритов и массы), рост надежности ячеек и блоков, систем и комплексов. Решением этих задач является создание микросборок, гибридных функциональных устройств (ГИФУ), а также систем в корпусе (System in Package, SiP), систем на кристалле (System on Chip, SoC) и многокристалльных модулей (Multichip modules (MCM)). Эти направления характеризуются применением базовых процессов тонко- и толстопленочной технологии для создания многоуровневых коммутационных плат с высокой плотностью проводников (вместо печатных плат), причем такие платы одновременно могут служить высокоэффективным средством теплоотвода. Кроме того, для них характерна высокая плотность размещения на коммутационной плате ИМС и радиокомпонентов (чаще всего бескорпусных).

Основные сферы применения современных микросборок и гибридных интегральных схем:

- авиационная, военная и космическая техника;
- медицина;
- автомобильный транспорт;
- телефония;
- радиолокация.

С учетом сфер применения, к конструкциям современных микросборок предъявляются следующие требования:

1) нормальной работы устройств при действии дестабилизирующих факторов окружающей среды (температура, давление, влажность, вибрации и т.п.);

2) минимальной материалоемкости;

3) минимизации массогабаритных показателей;

4) нормальной работы с необходимой надежностью;

5) условий для автоматизации процессов монтажа и сборки;

6) полного исключения ручных операций;

7) полной автоматизации на этапе проектирования устройств на базе типовых оптимизированных конструкций;

8) взаимозаменяемости отдельных функциональных узлов и блоков;

9) ремонта отдельных устройств, простого исправления отдельных дефектов проектирования на этапе изготовления первых серий изделий.

Дополнительными требованиями являются:

1) максимальное исключение из конструктивных материалов драгоценных металлов и остродефицитных материалов;

2) максимальное сокращение числа паяных и сварных соединений, герметичных швов, клеевых соединений;

3) уменьшение потерь в СВЧ-трактах.

Кроме того, создатели современных микроэлектронных устройств прежде всего должны обеспечить минимальное время прохождения сигнала (минимальные потери) от одного кристалла ИМС к другому. В недалеком прошлом это было существенно лишь для построения СВЧ-устройств. Однако усовершенствование конструкции технологии изготовления микроэлектронных приборов и схем увеличило как число логических функций, которые можно разместить в одном кристалле, так и скорость выполнения арифметических операций современных ЭВМ и аппаратуры приема и обработки информации. В этом случае быстроедействие центральных

процессоров многих машин стало определяться временем прохождения между кристаллами. Для уменьшения времени задержки сигналов кристаллы следует располагать как можно ближе друг к другу, а длина соединительных проводников должна быть как можно меньше. Коммутационные платы при этом должны обладать значительно большей плотностью размещения соединительных шин, чем существующие.

1. Основные определения, классификация микросборок

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 транзисторов, 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.

В настоящее время методами пленочной технологии реализуются только пассивные элементы микросхем и МСБ – резисторы. 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 электрорадиоэлементов 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 называют навесными компонентами. Этим подчеркивается, что они изготавливаются отдельно и представляют собой самостоятельные изделия, которые могут приобретаться изготовителем гибридных микросхем как покупные изделия.

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, разрабатываемой и изготавливаемой разработчиками конкретной радиоэлектронной аппаратуры для улучшения показателей ее миниатюризации, надежности и технологичности.

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.

По технологии производства она не отличаются от гибридных интегральных схем или больших ГИС. Как правило, по высокой степени интеграции или большой функциональной сложности МСБ соответствует БГИС. Однако микросборку изготавливают специально для конкретной МЭА. В отличие от ГИС и БГИС, представляющих собой самостоятельные законченные изделия об-

щего 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.

Классификация элементов и составных частей в соответствии с ГОСТ 26975-86 (МИКРОСБОРКИ, термины и определения) приведена в табл. 1.

Таблица 1. Микросборки, термины и определения

Термин	Определение
1. Микросборка	Микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигнала, состоящее из элементов и (или) компонентов, размещенных на общей подложке, разрабатываемое для конкретной радиоэлектронной аппаратуры с целью улучшения показателей ее миниатюризации и рассматриваемое как единое целое с точки зрения требований
2. Элемент микросборки Элемент	Часть микросборки, которая реализует функцию электрорадиоизделия, выполнена нераздельно от платы и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке и поставке. <i>Примечание.</i> Под электрорадиоизделием понимают изделие, выполняющее функцию генерирования, преобразования, переключения, задержки, распределения, запоминания и фильтрации радиочастотных сигналов
3. Компонент микросборки Компонент	Часть микросборки, которая реализует функцию электрорадиоизделия и может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке и поставке
4. Корпусная микросборка	—
5. Бескорпусная микросборка	—

Продолжение табл. 1

Термин	Определение
6. Аналоговая микросборка	Микросборка, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной функции
7. Цифровая микросборка	Микросборка, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции
8. Аналого-цифровая микросборка	Микросборка, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону непрерывной и дискретной функций
9. Подложка микросборки Подложка	Заготовка, предназначенная для нанесения на нее элементов микросборки, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, контактных площадок и установки компонентов микросборки
10. Плата микросборки Плата	Подложка микросборки, на поверхности которой нанесены пленочные элементы микросборки, межэлементные и (или) межкомпонентные соединения и контактные площадки
11. Контактная площадка микросборки	Металлизированный участок на плате микросборки, служащий для присоединения выводов компонентов и перемычек, а также для контроля электрических параметров и режимов
12. Пленочный элемент микросборки	—

Окончание табл. 1

Термин	Определение
13. Вывод микросборки Вывод	Часть конструкции микросборки, предназначенная для электрического соединения микросборки с внешними электрическими цепями
14. Корпус микросборки Корпус	Часть конструкции микросборки, предназначенная для ее защиты от внешних воздействий при эксплуатации
15. Многослойная плата микросборки Многослойная плата	Плата микросборки, пленочные элементы, межэлементные и межкомпонентные соединения которой формируются на отдельных подложках с последующим соединением в единую структуру
16. Плотность упаковки микросборки Плотность упаковки	Отношение суммы элементов микросборки и элементов, входящих в компоненты микросборки, к ее объему. <i>Примечание.</i> Объем выводов не учитывают
17. Степень интеграции микросборки Степень интеграции	Показатель степени сложности микросборки, характеризующийся числом содержащихся в ней элементов. <i>Примечание.</i> Степень интеграции K определяют по формуле $K = \lg N$, где K – десятичный логарифм, округленный до ближайшего большего целого числа; N – число элементов микросборки и элементов, входящих в компоненты микросборки

На рис. 1 и рис. 2 показаны микросборки на жестких основа-
ниях.

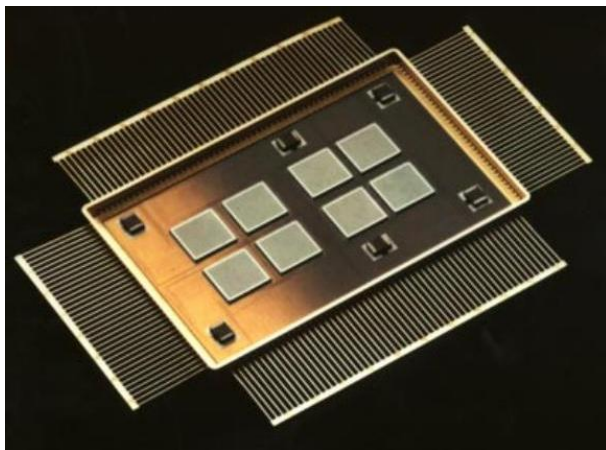


Рис. 1. Высокопроизводительный модуль цифровой обработки сигналов (DSP)
на тонкопленочной коммутационной плате

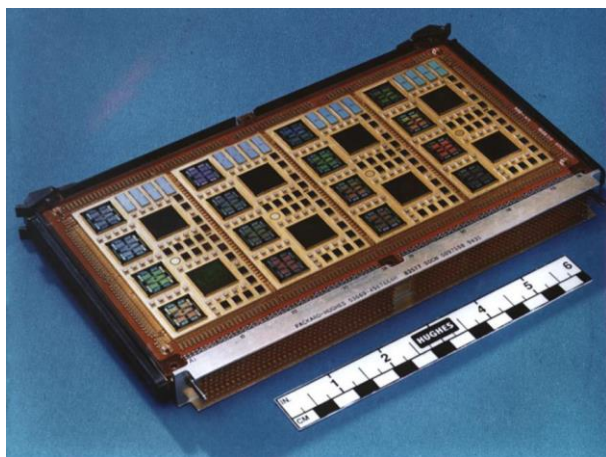


Рис. 2. Высокопроизводительный модуль авионики на основе тонкопленочной
многокристалльной платы, выполненный в форм-факторе карты расширения

Технология специализированных 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.

Основу изготовления ГИС, БГИС и МСБ составляют два технологических метода производства: толсто пленочная и тонко пленочная технологии. Эти технологические методы принципиально отличаются как по технологическим маршрутам изготовления схем, так и по их характеристикам и назначению. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики двух названных методов.

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.

Таблица 2. Сравнительные технологических методов

Технологический вариант	Преимущества	Недостатки
Тонкопленочная технология	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	Выше стоимость подготовки производства
Толстопленочная технология	Высокая допустимая мощность. Широкий диапазон номиналов элементов. Возможность создания многоуровневых схем. Простота технологии. Не требует вакуума. Возможность применения подгонки	Низкая точность и стабильность параметров. Малая степень интеграции. Большое сопротивление проводников. Невозможность контроля параметров в процессе технологии

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.

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: связана наличием и монтажом 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.

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 элемен-

тов 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, использующим 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 формирование рисунка можно осуществлять либо последовательно друг за другом, либо одновременно. Кроме того, контуры элементов 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).

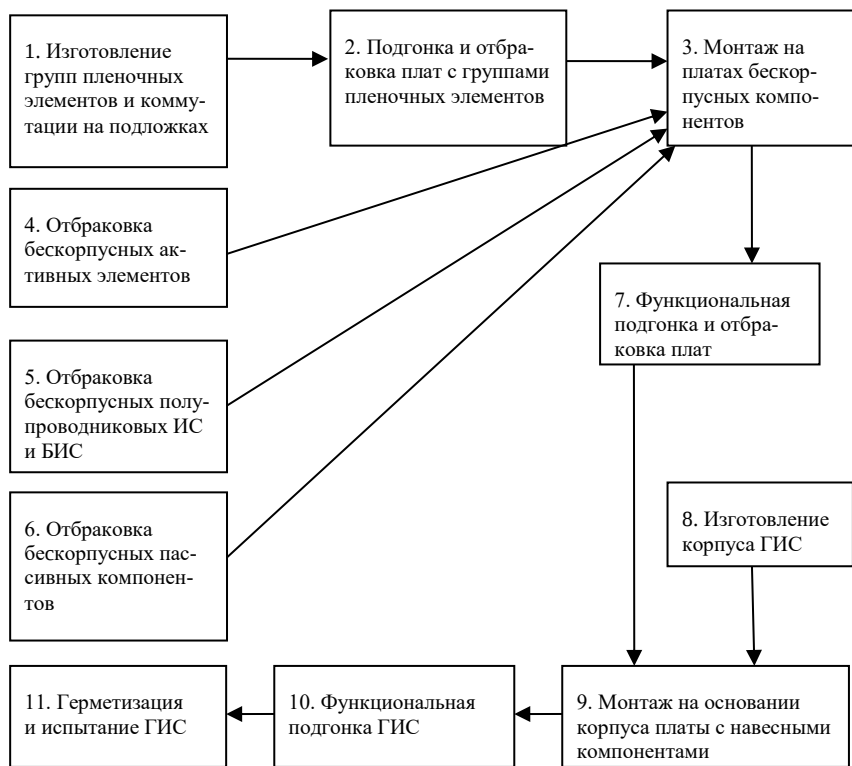


Рис. 3. Укрупненная схема технологического процесса изготовления ГИС



Рис. 4. Укрупненная схема технологического процесса изготовления БГИС

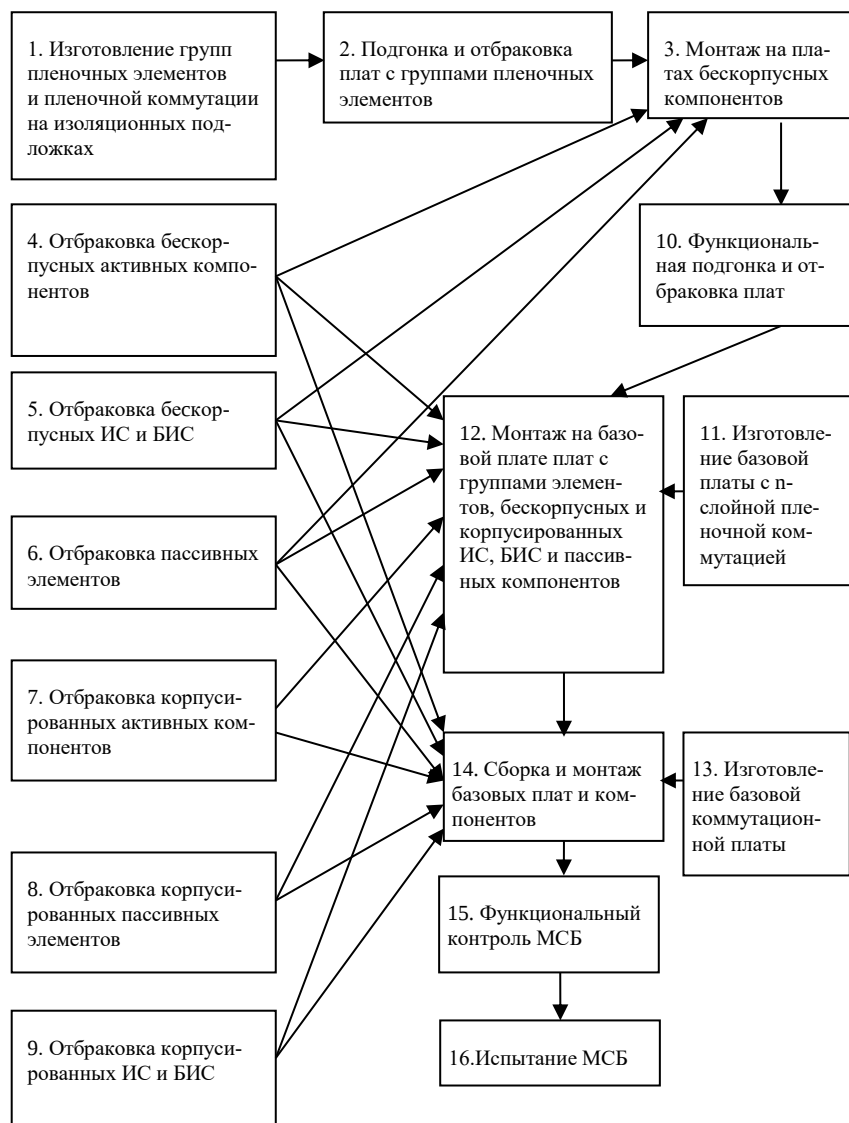


Рис. 5. Укрупненная схема технологического процесса изготовления МСБ



Рис. 6. Укрупненная модель формирования пленки различными технологическими вариантами

2. Материалы для микросборок

2.1. Материалы для подложек 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 для гибридных схем выполняют три основные функции:

- Механическое крепление для сборки устройств.
- Основание для дорожек электрических схем и формирования пленочных резисторов.
- Средство для рассеивания тепла от устройств.

Помимо этих основных механических, электрических и тепловых функций, подложки должны соответствовать многим другим электрическим, тепловым, физическим и химическим требованиям, среди которых:

Высокое электрическое сопротивление изоляции – чтобы избежать утечек тока между близко расположенным проводниками. Минимальные объемное удельное сопротивление больше 10^{14} Ом · см и поверхностное сопротивление изоляции больше 10^9 Ом. Другими важными электрическими свойствами, особенно в высокоскоростных, высокочастотных цепях, являются диэлектрическая постоянная, коэффициент рассеяния и тангенс угла потерь.

Низкая пористость и высокая чистота – во избежание попадания влаги и загрязняющих веществ, искривлений и миграции металлов.

Высокая теплопроводность – для рассеивания тепла устройства.

Малый коэффициент теплового расширения – чтобы максимально приблизить коэффициенты расширения к прикрепленным устройствам, таким образом минимизируя напряжения и избегая трещин при термическом циклировании.

Высокая температурная стабильность – выдерживать высокие температуры, без разложения или выделения газов, связанные с последующей обработкой. Среди самых высоких температур обработки – температуры при герметизации в ленточной печи, эвтектической штамповке и прикрепление эвтектической матрицы и подложки, а в случае толсто пленочных – при отжиге.

Высокая степень гладкости поверхности – для достижения стабильных, точных, тонкопленочных резисторов и очень тонких проводящих линий и расстояний между ними.

Высокое химическое сопротивление – выдерживать воздействие химическими кислотами, используемыми при травлении и покрытии.

Сочетание этих требований существенно сокращает количество доступных материалов. Среди материалов, которые первоначально использовались для подложек гибридных схем, были стекло и глазуванная глиноземная керамика. Характеристики подложек приведены в табл. 3.

Таблица 3. Свойства материалов подложки для гибридной технологии и другие важные свойства (Н: неорганические, ПП: полупроводник, ПЛ: пластик)

Материал	Отн. ди- электр. проница- емость ε_r	Ди- электр. коэф. потерь	Удел. тепло- провод- ность [Вт / см ° К]	ТКЛР (25 ° С) $\Delta l /$ 1 / ΔT [10–6 / ° К]	ТКер $\Delta \varepsilon$ / $\varepsilon \Delta T$ [10–6 / ° К]	Тип
Керамика Al ₂ O ₃ (Чистота 99,5%)	9,8	0,0001	0,37	6,3	+136	Н
Керамика Al ₂ O ₃ (Чистота 96%)	9,4	0,001	0,35	6,4		Н
Сапфир	9,4; 1,6	0,0001	0,42	6	+110 +140	Н
Кварцевое стекло	3,78	0,0001	0,017	0,55	+13	Н
Гранулированное стекло	5,75	0,003 6	0,012	4,6		Н
Оксид бериллия Керамика (BeO) (98%)	6,3	0,006	2,1	6,1	+107	Н
Высоколегирован- ный кремний (Si) ($\rho = 103 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)	11,9	0,015	1,45	4,2		ПП
PTFE	2,1	0,0003	0,002	106	+350	ПЛ
Полиолефин (армированный стекловолокном)	2,32	0,0007	0,005	108	+480	ПЛ
PTFE	2,55	0,001	0,003	16– 100		ПЛ
алюминий			2,2	23,8		
медь			3,93	17		
инвар				1,5		

В меньшей степени, для некоторых специальных применений использовались бериллий, сапфир, кремний, кварц, нитрид алюминия, фарфоровая сталь. Однако керамика с высокой степенью чистоты и гладкой поверхностью является наиболее используемым сегодня, поскольку он наиболее точно соответствует всем требованиям, с учетом стоимости. При этом в качестве доминирующего материала можно назвать Al_2O_3 (оксид алюминия) с чистотой 96%. Оксид алюминия имеет хорошие электрические и механические свойства (табл. 3).

Он хрупкий, и это ограничивает максимальный размер до 10–15 см. После того, как материал был спечен, он тяжело поддается механической обработке. Тем не менее его можно легко разрезать путем разламывания после частичного вырезания лазером высокой мощности. Для небольших устройств обычно печатают и монтируют компоненты на группе подложек, которые производятся вместе, а затем разделяются в конце, чтобы сделать рациональный производственный процесс. Отверстия через подложку также могут быть выполнены с помощью лазера, но проще формировать контур подложки и отверстия для пробивки, пока керамика является пластичной перед спеканием. Теплопроводность 20–30 Вт / °С примерно в 100 раз лучше, чем для материалов с органическими подложками, а низкий коэффициент теплового расширения, $6 \cdot 10^{-6}$ / °С, является преимуществом для монтажа керамических компонентов и полупроводниковых микросхем.

Для схем с очень высокой рассеиваемой мощностью в настоящее время используются нитрид алюминия (AlN) подложки с теплопроводностью в 5 раз выше, чем Al_2O_3 . Большинство свойств аналогичны свойствам Al_2O_3 . Тепловой коэффициент расширения несколько ниже, $4,5 \cdot 10^{-6}$ / °С. Эти свойства вызывают потребность в специальных печатных пастах для AlN, чтобы избежать отслаивания во время высокотемпературной обработки. ВеО имеет еще

большую теплопроводность, чем AlN. Однако его использование ограничено тем фактом, что пыль и пар из BeO очень ядовиты. К этому факту также относится высокая цена.

Для продуктов большого объема с более низкими электрическими требованиями в качестве подложки в какой-то степени используется металл с эмалевым покрытием. По этой технологии могут быть изготовлены крупные МСБ, обладающие свойством электрического заземления (экранирования подложки).

Шероховатость/гладкость поверхности

Шероховатость или, наоборот, гладкость определяется как среднее отклонение в микронах от центральной линии, которая пересекает вершины и впадины поверхности. Если профиль поверхности берется с помощью движущегося алмазного стилуса (профилометра), и произвольная линия рисуется так, что области пиков над линией равны площади впадин ниже линии, среднее отклонение от линии называется средней центральной линией (CLA). При использовании тонких пленок на шероховатых поверхностях существует большой шанс для формирования несовершенных прерывистых пленок, имеющих микротрещины, напряжения и разрывы. Эта проблема не проявляется, когда толстые пленки имеют толщину около 1 мкм и полностью заполняют даже самые глубокие поверхности. Рис. 7 и 8 сравнивают профили поверхности относительно чистотой 99,6% Al_2O_3 подложки используемых для тонкопленочных схем с относительной грубой 96% Al_2O_3 подложкой, используемой для толстопленочных схем.

Гладкость керамики зависит от ее микроструктуры и плотности; чем меньше неровности и выше плотность, тем более гладкая поверхность. Микроструктура и плотность, в свою очередь, зависят от керамической композиции и способа получения подложек. Ранние подложки из оксида алюминия были непригодны для тонкопленочных целей, если поверхность не была отполирована или на нее наносилась глазурь.

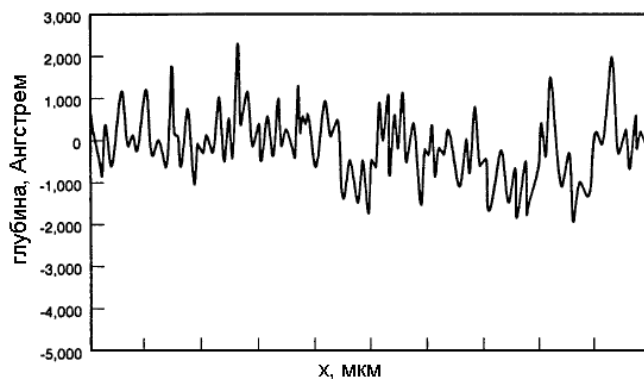


Рис. 7. Шероховатость поверхности подложки Al_2O_3 с чистотой 99,6%

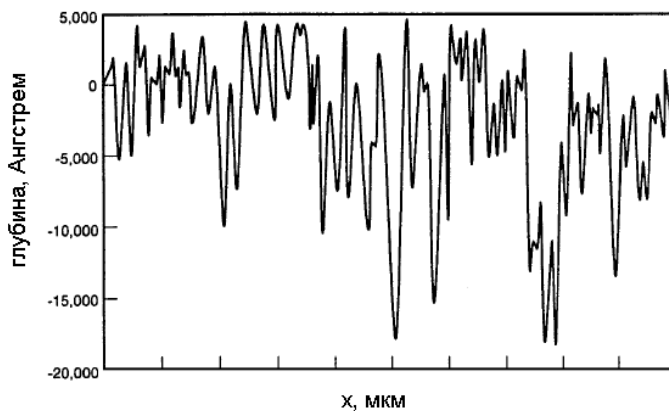


Рис. 8. Шероховатость поверхности подложки Al_2O_3 с чистотой 96%

Еще одним распространенным материалом для подложек МСБ являются ситаллы, которые 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 — кристаллизированное светочувствительное стекло. Он состоит из 75% оксида кремния, 11,5% оксида лития, 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.

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. 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.

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 прочности при изгибе σ _н ·10 ⁸ , Н/м ²	1,8	2,5	1,7	2,5	2,6

Форма подложки представляет собой четырехугольную пластину длиной L, шириной В и толщиной D. Для длины и ширины подложек ГИС и плат МСБ, изготавливаемых по тонкопленочной технологии, установлены соответствующие размеры (табл. 5).

Таблица 5. 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 – кристаллизированное светочувствительное стекло. Он состоит из 75% оксида кремния, 11,5% оксида лития, 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.

Материалы проводников и контактных площадок в тонкопленочной технологии. 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 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 нихрома. Однако применение в производстве МСБ NiCr при методе фотолитографии требует использования сильных травителей. 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.

Никель обладает высокой химической и температурной стойкостью, однако объемное удельное сопротивление его достаточно велико. Поэтому для уменьшения удельного поверхностного сопро-

тивления 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. 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.

В табл. 6 приведены наиболее распространенные тонкопленочные материалы, а также их назначение.

Таблица 6. Проводящие материалы, используемые в тонкопленочной технологии

Au, Ag	Контактные проводники, металлизация, толстые пленки, тонкие пленки, наполнитель теплопроводящих смол для крепления элементов
Cu	Бюджетные толстопленочные слои, тонкие пленки, фольга для печатных плат, наполнитель теплопроводящих смол для крепления элементов
Al	Контактные проводники, тонкопленочная металлизация

Окончание табл. 6

Cr, Ti, V	Адгезионный слой
Au-Ag	Бюджетные толсто пленочные паяемые проводники
Au-Si, Au-Ge	Эвтектический сплав для крепления омических контактов
Ag-Pd, Ag-Pt	Толстые пленки с низкой электромиграцией серебра
W, Mo-Mn	Толстые пленки для совместно обжигаемой керамики
Ni	Защитный металл, металл с низкой проводимостью
Sn-Pb	Припой соединения элементов и лужения плат
In	Низкотемпературный припой для крепления элементов
Sn-Ag	Низкотемпературный припой для пайки контактов

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 (Al_2O_3 , Ta_2O_5 , Hf_2O_5 и другие); окислы и нитриды полупроводников (SiO_2 , GeO , Si_3N_4 , 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.

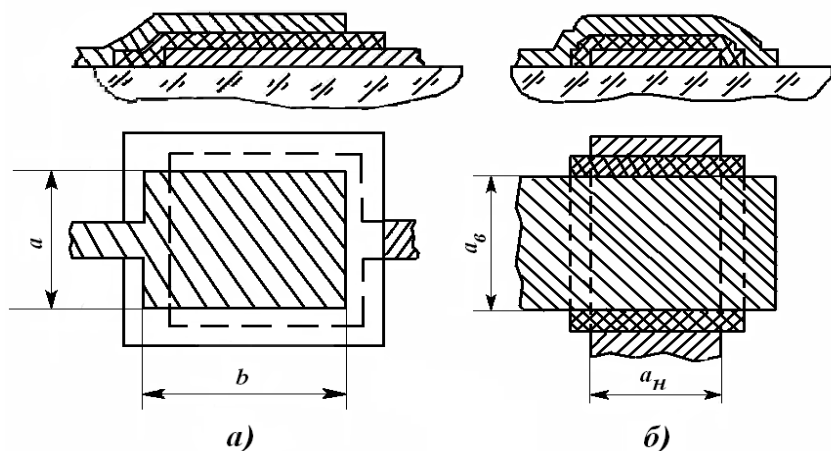


Рис. 9. Пленочные конденсаторы:
 а – большой емкости;
 б – малой емкости

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 предназначены для межуровневой изоляции в коммутационных схемах и формирования диэлектрика емкостных элементов. В качестве диэлектриков для тонкопленочных конденсаторов применяют так же оксиды тантала Ta_2O_5 и титана TiO_2 .

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...30
Оксид алюминия	0,15...0,2 70...100	10 8	(30...50)10 ³ (1...2)10 ³	2 6	50...80 200
Пятиокись тантала	0,15...0,2	22	(50...100)10 ³	4	100
Моноокись кремния	0,15...0,2	5	12 $\times 10^3$	3	5
Двуокись титана	0,15...0,2	80	25 $\times 10^3$	3	3

При изготовлении тонкопленочного конденсатора с диэлектриком из оксида тантала толщиной менее 1 мкм тантал служит одним из его обкладок. 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 10⁵ пФ/см². Высокая удельная емкость танталовых конденсаторов обусловлена не столько повышенной диэлектрической проницаемостью оксида тантала ($\epsilon = 20$), сколько возможностью нанесения тонких пленок диэлектрика.

Материалы для проводников, резисторов, диэлектриков в толсто пленочной технологии

Проводники, резисторы и диэлектрические материалы наносятся в виде пасты с помощью трафаретной печати, и они преобразуются (спекаются) путем нагревания до высокой температуры, «обжига». Пасты имеют три основных ингредиента:

- Функциональный порошок (частицы металла, сплава или оксида).
- Матрица или «связующее» (стеклянные частицы).
- Органические растворители и «временное связующее».

Органическими временными связующими являются полимеры, которые обеспечивают контроль над свойствами печати. Они разлагаются и испаряются в начале процесса обжига вместе с растворителями. Стеклообразные частицы расплавляются в процессе обжига, прилипают к подложке, связывают активные частицы и обеспечивают стабильность свойств изготовленных элементов. Высокая температура обжига, обычно 800–900 °C (рис. 10), важна для долгосрочной стабильности и надежности.

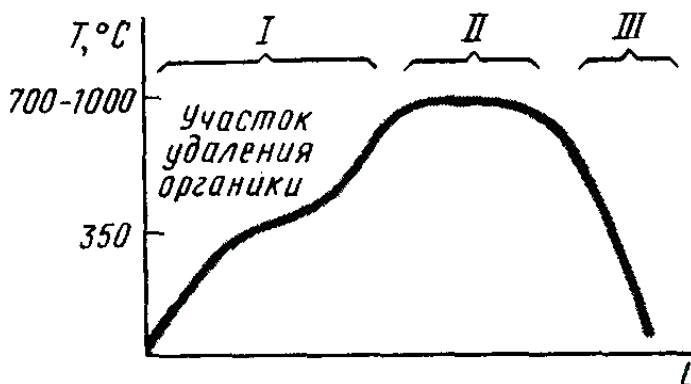


Рис. 10. Типичный температурный профиль для толсто пленочного обжига

Проводники

Проводящие пасты должны обладать свойствами:

- высокая электропроводность;
- высокая адгезия с основанием;
- хорошая способность к пайке для установки навесных компонентов.

Цена также является важным параметром.

Обычно одна проводящая паста не может удовлетворять всем этим критериям, и необходимо сделать несколько слоев.

Наиболее используемыми проводящими системами являются золото, медь, сплавы палладия / серебра, палладий / золото и платина / золото, свойства которых приведены в табл. 8. Благородные металлические сплавы используются, поскольку термическая обработка происходит при температуре выше 800 °С, когда другие металлы разрушаются окислением. Однако золото и платина являются дорогостоящими материалами, поэтому стоимость материала является важным фактором в конечной цене схемы. Золото очень хорошо подходит в качестве основы для склеивания, но оно не подходит для пайки. Это связано с тем, что золото очень быстро растворяется в припое во время пайки и дает хрупкую интерметаллическую композицию с плохими свойствами надежности. Чистое серебро имеет тенденцию к электромиграции, что может вызвать проблемы надежности через некоторое время. Однако серебро / палладий имеет относительно небольшую миграцию, отлично подходит для пайки и хорошо подходит для создания контактных зон для печатных толстопленочных резисторов. Поэтому этот сплав наиболее часто используется в качестве проводящего материала, хотя он имеет более низкую проводимость, чем чистые элементарные проводники. Серебро также используется в сплавах с платиной.

Медь обладает высокой проводимостью и низкой ценой. Однако сильное окисление на воздухе при высокой температуре делает необходимым, чтобы вжигание меди было в нейтральной атмосфере азота. Это делает техпроцесс более сложным и дорогостоящим, и препятствует использованию медных проводников. Никель также используется в некоторых случаях, но он имеет более низкую электропроводность, чем другие материалы.

Типичная толщина проводников составляет 5–10 мкм после обжига. Удельное сопротивление слоя обычно составляет от 2 до 25 мОм / кв. (см. табл. 8).

Таблица 8. Сравнение физических параметров для толсто пленочных проводников

Параметр	AgPd	Cu	Au
Устойчивость к листам (мОм / кв)	25	1.8	2.5
Ток пробоя (мА / мм ширины)	3 000	10 000	10 000
Толщина	10–20	15–30	5–15
Минимум с (мкм)	150	150	50
Диаметр сквозного отверстия	0,4–1,5	0,4–1,5	–
Количество проводящих слоев	1–3	1–5	1–5
Площадь подложки (см ²)	0,2–100	0,2–200	0,2–50
Толщина подложки (мм)	0,6–1	0,6–1	0,25–1

В табл. 9 приведено сравнение параметров пайки для толсто-
 пленочных проводников.

Таблица 9. Сравнение параметров пайки для толсто-
 пленочных проводников

Параметр	AgPd	Cu	Au
Пригодность к пайке	Хорошо	Хорошо	Невозможно
Смачивание	Хорошо	Почти отлично	—
Сопротивление выщелачиванию	Достаточно хорошо	Отлично	—
Адгезия	Отлично	Отлично	—
Визуальное качество	Хорошо	Отлично	—

2.2. Резистивные материалы

Важными свойствами толсто-
 пленочных резисторов являются:

- большой диапазон доступных значений резисторов;
- высокая стабильность;
- низкий тепловой коэффициент удельного сопротивления, с
 небольшим разбросом по подложке;
- низкая зависимость сопротивления от напряжения;
- хорошие шумовые свойства.

Резисторные пасты состоят из тех же трех основных ингредиентов, что и проводящие пасты, но активные элементы имеют более низкую электропроводность. Они чаще всего основаны на различных типах оксидов рутения: RuO_2 , BaRuO_3 , $\text{Bi}_2\text{Ru}_2\text{O}_7$. Кроме того, используются оксиды иридия, родий и осмий. Они могут изготавливаться с

сопротивлением слоя до примерно $1 \text{ Ом} / \text{кв}$ и до $10^9 \text{ Ом} / \text{кв}$ для слоя толщиной 25 мкм . Контактные площадки резисторов получают, печатая проводник снизу или поверх концов резистора (рис. 11).

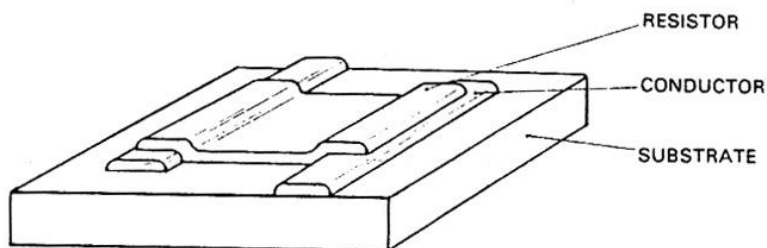


Рис. 11. Толсто пленочный резистор с контактными площадками

Удельное сопротивление слоя определяется активным материалом в пасте, количеством смешанного стеклянного связующего и технологией обработки.

3. Технология изготовления тонкопленочных элементов

3.1. Процесс осаждения

Выбрав материал подложки, следующим шагом при изготовлении тонкопленочных микросхем является осаждение металлов или металлических соединений на подложку. Эти металлы в конечном счете служат проводникам и резисторам структурно и функционально. Как правило, подложка последовательно покрывается слоем резистивного материала, разделительным металлическим слоем и верхним проводящим слоем. Эти слои относительно тонкие в пределах от 200 до 20 000 Å и осаждаются путем вакуумного испарения, распыления, химического осаждения из паровой фазы или вариациями этих процессов.

Тонкие проводящие, резистивные и диэлектрические пленки могут быть получены различными методами вакуумной технологии (рис. 12): термическим напылением, катодным распылением, ионно-плазменным распылением и др. Для формирования конфигурации пленок при вакуумной технологии используют методы съемной маски и контактного маскирования, а также фотолитографии. Каждый из перечисленных методов осаждения материалов и формирования конфигурации пленок имеет свои достоинства и недостатки. Выбор способа осаждения материалов и формирования конфигурации пленок при производстве гибридных интегральных микросхем определяется в основном возможностью получения всех тонкопленочных элементов с высокими конструктивными и эксплуатационными характеристиками и малой трудоемкостью. В

настоящее время наиболее универсальным и широко освоенным промышленностью методом является вакуумное термическое осаждение через съемные (свободные) маски.

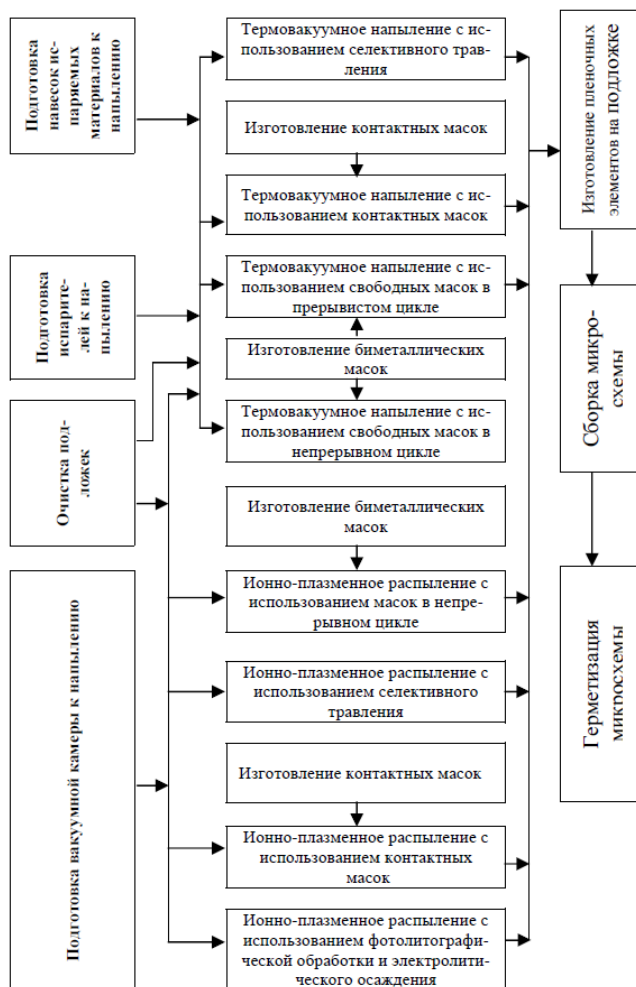


Рис. 12. Методы и основные этапы технологического процесса изготовления гибридных интегральных микросхем частного применения

3.2. Условия термовакuumного напыления

При термовакuumном напылении вещество, подлежащее осаждению на поверхности подложки, помещают в устройство нагрева (испаритель), где оно при достаточной температуре интенсивно испаряется. В вакууме, который создается внутри камеры установки, молекулы вещества свободно и быстро распространяются в окружающее пространство, достигая, в частности, поверхности подложки. Если температура подложки не превышает критического значения, происходит конденсация вещества на подложке, т.е. рост пленки. На начальном этапе испарения во избежание загрязнения пленки за счет примесей, адсорбированных поверхностью испаряемого вещества, для вывода испарителя на рабочую температуру используется заслонка, временно перекрывающая поток вещества на подложку. В зависимости от функционального назначения пленки в процессе осаждения контролируется время напыления, толщина, электрическое сопротивление или какой-либо другой параметр. По достижении заданного значения параметра заслонка вновь перекрывает поток вещества и процесс роста пленки на подложке прекращается. Нагрев подложки перед напылением способствует десорбции загрязнений с поверхности, а в процессе осаждения создает условия для улучшения структуры растущей пленки. Непрерывно работающая система откачки поддерживает вакуум порядка 20^{-4} Па.

Эффективность процесса напыления определяется малым временем осаждения и равномерностью толщины пленки по поверхности подложки. В соответствии с этим должны быть обеспечены: интенсивное испарение вещества из испарителя, прямолинейное движение молекул вещества преимущественно на подложку, интенсивный и равномерный рост пленки по поверхности подложки. Следовательно, процесс термического вакуумного напыле-

ния целесообразно представить в виде трех последовательных стадий: испарение вещества, перенос атомов вещества к подложке и конденсация.

Испарение вещества. Испарение вещества с поверхности имеет место при любой температуре, отличной от абсолютного нуля. Наибольшую вероятность покинуть поверхность вещества имеют наиболее «нагретые», т.е. обладающие наибольшей энергией, молекулы (атомы). С повышением температуры средняя энергия молекул возрастает и на поверхности увеличивается число молекул, энергия которых превышает энергию связи с другими молекулами. Процесс испарения становится равновесным, когда число молекул, покидающих поверхность вещества, равно числу молекул, возвращающихся в вещество. Давление пара P_s , соответствующее равновесному состоянию системы, называется давлением насыщенного пара, или его упругостью. Температуру вещества, при которой $P_s = 1,33$ Па, называют условной температурой испарения $T_{\text{исл}}$. Для некоторых материалов условная температура испарения ниже температуры плавления (табл. 2), т.е. эти материалы достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния (сублимация).

Осаждение вещества на поверхность подложки возможно лишь за счет неравновесного процесса испарения, т.е. пары вещества должны интенсивно отводиться от испарителя и конденсироваться на относительно холодной поверхности. При этом молекулы вещества удаляются из испарителя с определенной скоростью:

$$w = C(P_s - P)/P_0,$$

где w – скорость испарения (количество вещества в граммах, покидающее 1 см^2 свободной поверхности за 1 с);

C – постоянный коэффициент; P_s – упругость пара;

P – истинное (неравновесное) давление пара; P_0 – давление окружающего газа. Из этого выражения следует, что чем выше давление окружающего газа, тем ниже скорость рассасывания пара в окружающее пространство, а следовательно, и скорость испарения. Следует отметить, что с технологической точки зрения важнее знать скорость конденсации паров на подложке, чем скорость испарения материала.

Перенос молекул вещества к подложке. Высокий коэффициент использования испаряемого материала можно получить при прямолинейном и направленном движении молекул испаряемого вещества к подложке. Прямолинейные траектории молекул вещества (молекулярный поток) характеризуются средней длиной свободного пробега молекул, которая определяется степенью вакуума в камере установки (табл. 10).

Таблица 10. Зависимость средней длины λ , свободного пробега атомов (молекул) от степени давления P газов

$P, \text{Па}$	$\lambda, \text{м}$	Степень вакуума
101325 $1,333 \cdot 10^2$ $1,333 \cdot 10^1$ 1,333	$6,21 \cdot 10^{-8}$ $4,72 \cdot 10^{-5}$ $4,72 \cdot 10^{-4}$ $4,72 \cdot 10^{-3}$	Низкая
$1,333 \cdot 10^{-1}$ $1,333 \cdot 10^{-2}$	$4,72 \cdot 10^{-2}$ $4,72 \cdot 10^{-1}$	Средняя
$1,333 \cdot 10^{-3}$ $1,333 \cdot 10^{-4}$ $1,333 \cdot 10^{-5}$	4,72 $4,72 \cdot 10^1$ $4,72 \cdot 10^2$	Высокая

В случае $\lambda > h$ (h – расстояние от испарителя до подложки) молекулярный поток вещества достигает поверхности подложки без столкновения с молекулами остаточного газа. С учетом реального расстояния h в производственных вакуумных установках давление в камере должно составлять не более 10^3 Па.

Для повышения чистоты осаждаемой пленки (отсутствия химического взаимодействия с остаточными газами и адсорбции их растущей пленкой) требуется более глубокий вакуум. Однако экономичным в производственных условиях является вакуум $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па, который достигается относительно простыми средствами откачки за 1...1,5 ч.

Конденсация вещества на подложке. Процесс осаждения вещества на подложке состоит из двух этапов: начального – с момента адсорбции первых атомов (молекул) вещества подложкой до момента образования сплошного покрытия и завершающего, на котором происходит рост пленки до заданной толщины.

Условия, в которых протекает начальный этап, имеют определяющее значение для структуры полученной пленки, прочности ее сцепления с подложкой, времени формирования пленки. Атомы вещества движутся к подложке со скоростями порядка сотен тысяч метров в секунду. Например, атомы алюминия при испарении с температурой 1500 °С имеют среднюю скорость около 1100 м/с и среднюю энергию 0,2 эВ. При столкновении с подложкой атом передает ей часть энергии, причем доля этой энергии тем меньше, чем выше температура подложки. Обладая некоторым избытком энергии, атом вещества некоторое время перемещается (мигрирует) по поверхности подложки, теряя постепенно энергию и, стремясь к тепловому равновесию с подложкой, адсорбируется на ней. После соударения атомов с подложкой может происходить адсорбция с формированием мелкозернистой или крупнозернистой структуры или вторичное испарение. Для каждого вещества существует критическая температура подложки, выше которой атомы потока полностью отражаются от подложки. Если плотность потока высока и температура подложки относительно низка, вероятность вторичного испарения уменьшается, а вероятность встречи атомов на подложке увеличивается. При этом атомы образуют группы из двух и

более атомов, которые и являются центрами кристаллизации (зародышами). Дальнейший рост зародышей происходит за счет непосредственного осаждения атомов на поверхности зародышей. Разрастаясь, отдельные островки-зародыши сливаются, постепенно образуя сплошную пленку. На завершающем этапе происходит рост сплошной пленки и от поверхности пленки атомы практически не отражаются.

Крупнозернистая структура пленки устойчива к колебаниям температуры в процессе эксплуатации. Мелкозернистые пленки при повышенных рабочих температурах эксплуатации рекристаллизуются, что ведет к необратимому изменению электрофизических параметров. Поэтому резистивные и диэлектрические пленки напыляют на нагретые до 150...350 °С подложки.

3.3 Испарители для термического вакуумного напыления

Конструкции испарителей должны обеспечивать стабильность потока вещества во времени и достаточно равномерную плотность потока атомов в поперечном сечении. Материал испарителя должен нагреваться с наименьшими затратами и потерями энергии, т.е. быть экономичным даже при низкой теплопроводности испаряемого материала и плохом тепловом контакте его с испарителем. В конструкции испарителя должна учитываться исходная форма испаряемого материала (проволока, гранулы, порошок), его емкость должна быть достаточной для выполнения цикла многопозиционной обработки или непрерывного процесса напыления. Материалы нагревателя и держателя испаряемого вещества не должны взаимодействовать с испаряемым материалом с образованием летучих химических соединений, должны иметь более высокую температуру испарения. При термическом вакуумном напылении испаряемые

материалы нагреваются прямым или косвенным путем: при прямом нагреве – за счет непосредственного пропуска через материал тока (резистивный нагрев), индукционным способом или электронной бомбардировкой; при косвенном нагреве – за счет теплопередачи от испарителя.

Простейшими являются проволочные и ленточные испарители различных конструкций (рис. 13). Испарители из ленточного (листового) материала обычно изготавливают из вольфрама, тантала или молибдена толщиной 0,25 мм. Они используются для навесок до нескольких граммов, а также в случае плохой смачиваемости. Испарители в виде тиглей (рис. 13) применяют, если необходимо загружать большие количества (как правило, сыпучего) материала (несколько граммов и более). Материал тигля подбирают в зависимости от испаряемого материала (табл. 11).

Таблица 11. Температуры плавления и испарения некоторых элементов и соединений

Материал	Плотность, кг/дм ³	Атомная плотность N_0 , $\times 10^{28}$, атом/м ³	Условная температура испарения, К	Коэффициент А	Коэффициент А	Энергия сублимации, $E_{\text{суб}}$, эВ
Ag	10,49	5,85	1 320	10,78	14 090	2,7
Al	2,7	6,04	1 423	11,11	15 630	3,26
Cu	8,96	8,52	1 546	10,84	16 580	3,56
Mo	10,2	6,39	2 800	10,92	30 310	6,9

Окончание табл. 11

Материал	Плотность, кг/дм ³	Атомная плотность N_0 , $\times 10^{28}$, атом/м ³	Условная температура испарения, К	Коэффициент Λ	Коэффициент Λ	Энергия сублимации, $E_{\text{суб}}$, эВ
Au	19,32	5,90	1 738	10,77	18 520	3,92
Pt	21,5	6,61	2 360	11,75	27 500	5,56
Ti	4,52	5,66	1 832	11,1	20 110	4,34
W	19,3	6,09	3 580	11,36	40 260	8,76
Ni	8,9	9,03	1 780	11,67	20 600	4,41
Cr	7,19	7,64	1 478	12,0	17 560	3,68
Si	2,42	5,04	1 615	12,32	19 700	3,91
Ta	16,6	5,52	3 340	12,12	40 210	8,7
Ge	5,32	4,53	1 520	10,12	15 150	3,77
Cd	8,65	538	10,9	5 800		
Fe	7,86	8,48	1 720	12,53	21 960	4,15
Zn	6,5	616	11,06	6 740		

Максимально допустимые (рабочие) температуры [°C] некоторых материалов тиглей следующие:

Mo – 1 820, BeO – 1 900, Ta – 2 240, ZrO₂ – 2 200, W – 2 410, TiO₂ – 2 500, SiO₂ – 1400 (кварцевое стекло), C – 3 000 (графит), Al₂O₃ – 1 900.

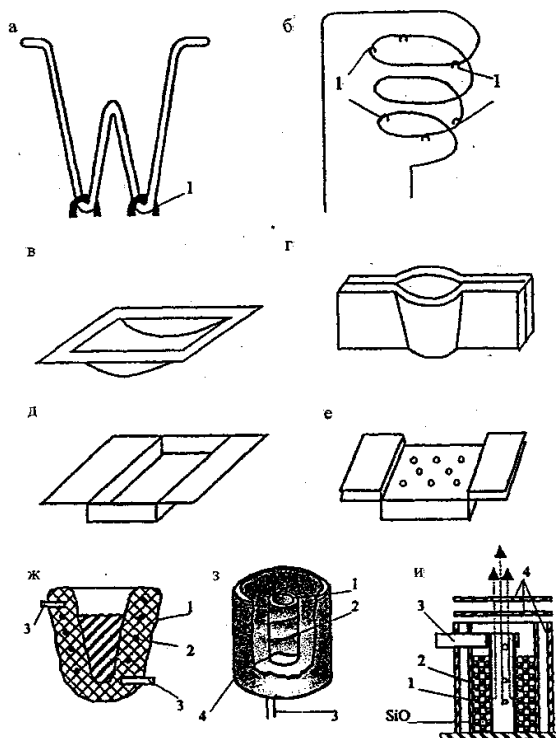


Рис. 13. Испарители:

а, б – проволочные (1 – навески испаряемого материала);
в, г, д, е – ленточные; ж, з, и – тигельные (1 – тигель, 2 – нагреватель,
3 – токоотводы, 4 – тепловые экраны)

Устройство вакуумной системы напыления показано на рис. 14.

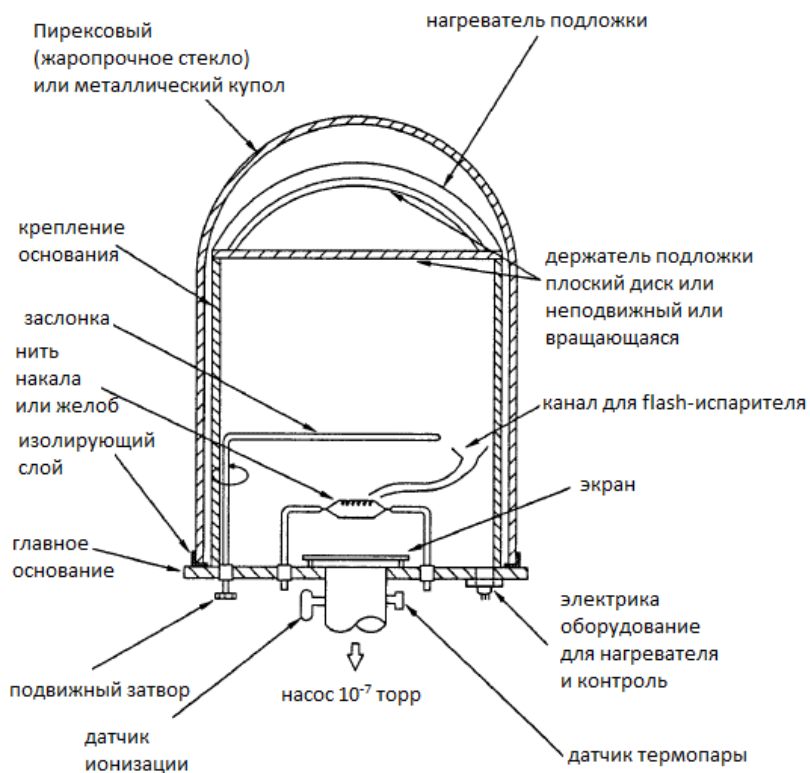


Рис. 14. Схема вакуумной системы напыления

При осаждении термическим испарением основные технологические параметры определяются с помощью следующих соотношений.

Давление насыщенных паров:

$$P_s = 10^{\left(A - \frac{B}{T_u}\right)},$$

где A , B определяются по табл. 11, T_u — температура испарения.

Скорость испарения:

$$\omega_u = P_s \sqrt{\frac{m}{2 \pi k T_u}} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right],$$

где m – масса молекулы ($1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$);

k – постоянная Больцмана.

Скорость конденсации:

$$\omega_k = \frac{\omega_u S}{4 \pi \rho} \frac{1}{h^2} [\text{м/с}],$$

где S – площадь испарителя, ρ – плотность вещества, h – расстояние от испарителя до подложки.

Скорость роста пленки:

$$t = \frac{d}{\omega_k},$$

где d – толщина слоя.

Метод резистивного нагрева, несмотря на то что широко используется, имеет 4 проблемы:

- Расплавленный металл может быть сплавлен с материалом тигеля, загрязняя таким образом исходный материал.

- Тугоплавкие металлы имеют такие высокие температуры испарения даже при низких давлениях, что они не могут быть осаждены нагревом сопротивления.

- Сплавы металлов, имеющих разное давление пара, будут разделяться при осаждении, что приведет к изменениям состава и свойств осажденной пленки.

Скорость испарения может меняться, что затрудняет последовательное нанесение покрытий равномерной толщины.

Эти проблемы в значительной степени могут быть устранены изменениями в процессе вакуумного осаждения. Например, для осаждения сплавов и минимизации разделения следует использовать

испарение «вспышкой» (взрывное испарение). Этот процесс состоит в том, что небольшие порции из порошка сплава поступают вниз по вибрирующей наклонной плоскости в лодочке, поддерживаемый при достаточно высокой температуре, чтобы испарить оба компонента, как только они соприкоснутся с лодочкой (рис. 15). Никель-хромовый сплав и некоторые металлокерамические резисторы могут быть осаждены таким образом.

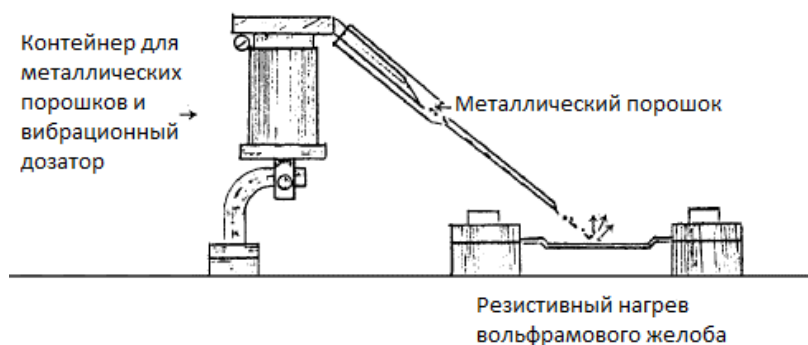


Рис. 15. Механизм испарение «вспышкой»

Испарение электронным пучком используется для осаждения тугоплавких металлов, таких как титан, вольфрам, тантал и молибден. Вакуумная камера оснащена механизмом, который позволяет электронному лучу сфокусироваться и воздействовать на металл, заставляя его нагреваться и испаряться. Контролируя энергию электронного пучка, можно контролировать и ограничить глубину и площадь расплава, чтобы расплавленный металл не контактировал и не взаимодействовал с материалом лодочки.

Осаждение тонких пленок в вакууме методом термического испарения осуществляется путем подведения к веществу энергии рези-

стивным, высокочастотным, электронно-лучевым нагревом, электронной бомбардировкой. Классификация методов термического испарения приведена в табл. 1.

Осаждение тонких пленок в вакууме ионным распылением заключается в распыление атомов вещества из поверхностных слоев мишени высокоэнергетичными атомами инертного газа.

Классификация методов нанесения тонких пленок методом ионного распыления приведена в табл. 2.

При осаждении ионным распылением основные технологические параметры следующие:

$$P = 10^{-2} - 10^{-5} \text{ Па};$$

$$T_{\text{п}} = 293 - 693 \text{ К};$$

$$V_0 = \frac{3.3 \cdot 10^{-3} j_u \cdot S \cdot M \cdot F_p}{\rho \cdot d^2};$$

$$V_0 = 0,1 - 1,0 \text{ мкм/с}; E = 0,1 - 0,3 \text{ эВ}.$$

К достоинствам ионного распыления относится универсальность (можно наносить металлы и диэлектрики), регулируемая скорость осаждения и относительно простая конструкция.

В основе ионного осаждения лежит два процесса: 1) генерация плазмы исходного вещества с помощью одного из типов электрического разряда или ВЧ-индуктора; 2) ускорения ионов или всей плазмы с последующей их концентрацией на поверхности подложки.

При ионным основные технологические параметры следующие:

$$P = 10^{-2} - 10^{-5} \text{ Па};$$

$$T_{\text{п}} = 293 - 693 \text{ К};$$

$$V_0 = \frac{q_{\text{max}} \cdot M \cdot 10^2}{E_{\text{опт}} \cdot \rho};$$

$$E = 1 - 1\,000 \text{ эВ}.$$

Основными достоинствами метода ионного осаждения являются регулируемая в широких пределах энергия осаждаемых частиц и высокая скорость осаждения. Недостатки – сложность реализации и распыление конструкционных материалов.

Тонкопленочные резистивные процессы. Тонкопленочные резисторы. Важными факторами при выборе тонкопленочных резисторов являются:

- контролируемое и воспроизводимое сопротивление поверхности (Ом/кв) для практического диапазона толщины;
- низкий температурный коэффициент сопротивления (ТКС);
- точная обработка резистора;
- долгосрочная стабильность (низкий дрейф сопротивления при включении или при термическом старении).

Таблица 12. Сравнение процессов испарения и распыления

	Вакуумное напыление	Распыление
Механизм	Тепловая энергия Скорость осаждения может быть высокой (до 750 000 Å/мин)	Передача импульса Низкая (20–100 Å/мин), за исключением некоторых металлов (Cu = 10 000 Å/мин)
Контроль осаждения	Иногда сложно	Воспроизводимость и легкость управления
Покрытие для сложных форм	Плохо	Хорошая, но неравномерная толщина
Покрытие в маленьких глухих отверстиях	Плохо, плоскостный	Плохо

Окончание табл. 12

	Вакуумное напыление	Распыление
Осаждение металла	Да	Да
Осаждение сплава	Да (взрывное испарение)	Да
Осаждение туго- плавких металлов	Да (электронным пучком)	Да
Покрытие пластиков	Нет	Некоторые да
Неорганические со- единения (оксиды, нитриды)	Нет	Некоторые да
Адгезия к подложке	Хорошая	Отличная

3.4. Технологические процессы с использованием нихрома

Независимо от того, используются ли нихром, нитрид тантала или металлокерамика, этапы процесса очень схожи. Во-первых, структура «сэндвич» резистора/проводника формируется на керамической подложке путем последовательного осаждения тонких слоев резистора, барьерного металла и верхнего проводящего металла. Затем посредством фотолитографии формируется сложный рисунок проводящих линий и промежутков (от 1 до 10 мкм) и тонкопленочных резисторов (от 5 до 20 мкм) в ширину. Последовательные этапы процесса показаны на рис. 16.

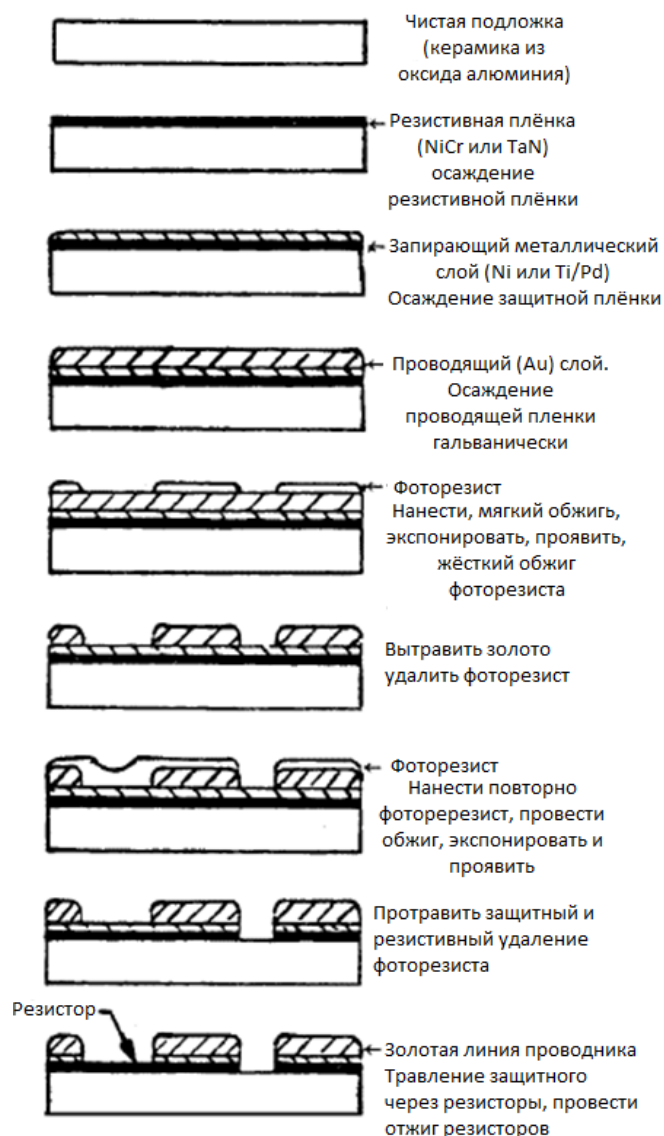


Рис. 16. Технологическая последовательность для осаждения тонкопленочных проводников и резисторов

Структура сэндвича нихрома/никеля/золота может быть осаждена либо путем вакуумного испарения, либо путем распыления (обсуждалось выше). Желательно последовательно осаждать металлы в одном вакуумном цикле. Если вакуумный цикл прерван или если части подвергаются воздействию воздуха между осаждениями, может произойти окисление или загрязнение пленок, ухудшая адгезию последующих слоев и стабильность резисторов. Следует отметить, что два ключевых процесса осаждения тонкопленочного золота, вакуумного испарения и распыления приводят к очень тонким слоям 0,3–1 мкм, что недостаточно для обеспечения достаточной электропроводности или достаточной толщины металла для последующего соединения микросваркой. Чтобы увеличить толщину золота, на тонкие пленки наносят дополнительно гальванически 2–5 мкм золота.

Альтернативный нихромный процесс, используемый некоторыми производителями, включает осаждение слоя нихрома и его травление, чтобы сформировать резисторы до осаждения слоя золота. После образования резисторов слои титана, палладия и золота последовательно распыляются по всей поверхности, золото гальванизируется с целью увеличения его толщины и проводимости, а затем фото травления с образованием контактных площадок и схемных линий. Затем резисторы отжигаются и при необходимости подгоняются лазером. Этот процесс дает очень точные допуски размеров, точное сопротивление резисторов, необходимое для высокочастотных схем. Хотя нихромовые резисторы более восприимчивы к электролитической и химической коррозии и окислению, чем из нитрида тантала, они, как правило, не пассивируются, если схема герметизирована в азоте. Для промышленных негерметичных применений пассивация была выполнена путем выборочного покрытия нихромовых резисторов с органическими покрытиями или с неорганическими напыленными покрытиями, такими как моно-

окись и двуокись кремния. Органические покрытия должны обладать высокой чистотой, термически и химически устойчивыми и обладать стабильными электрическими изоляционными свойствами. Примеры включают полиимиды, силиконы и полиоксиды.

Нихромы, используемые для тонкопленочных резисторов, представляют собой сплавы никеля и хрома. Различные соотношения этих металлов могут быть использованы для достижения различных значений сопротивления слоя. Две общеупотребительные композиции – это 50% никеля, 50% хрома с 1–5% кремния и 80% никеля, 20% хрома. Резисторы из нихрома трудно осаждаются последовательно с той же толщиной и сопротивлением поверхности, когда используется нагрев сопротивления. Состав осажденной пленки отличается от состава исходного материала из-за различий в температурах испарения и давлениях пара никеля и хрома (рис. 17). Кроме того, состав исходного материала в тигле или лодочке постоянно изменяется во время испарения, становясь более насыщенным никелем из-за его более низкого давления пара. Исследования показали, что состав осажденной нихромовой пленки приближен к составу исходного материала (80% Ni, 20% Cr) только при температурах выше 1 600 °C (рис. 18), но осаждение при таких высоких температурах привело к такой быстрой скорости испарения, что качество пленки ухудшилось. Теперь пленки, приближенные к составу исходного материала, могут осаждаться при более низких температурах при помощи флэш-испарения или распыления. Эти процессы приводят к небольшому разделению двух металлов, и воспроизводятся стабилизированные резисторы. В флэш-испарении никель-хромовой порошок медленно добавляют в предварительно нагретую лодочку, изготовленную из вольфрама или другого тугоплавкого металла. Порошок, вибрируя, поступает вниз по склону в лодочку. Нихром сразу испаряется при контакте с лодочкой. Вакуум в камере поддерживается на уровне от 10^{-6} до 10^{-7} мм рт. ст. а

температура лодки поддерживается между 1 000 °С и 1 100 °С. Для лучшей адгезии пленки к подложке, последняя подогревается до 150–300 °С.

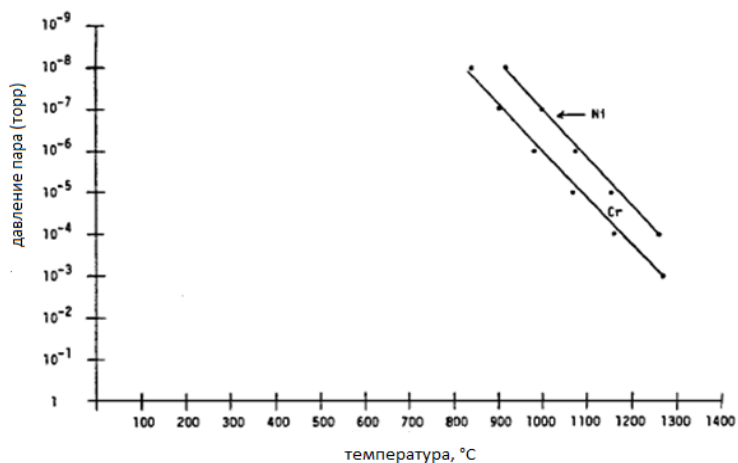


Рис. 17. Кривые давления и температуры пара для никеля и хрома

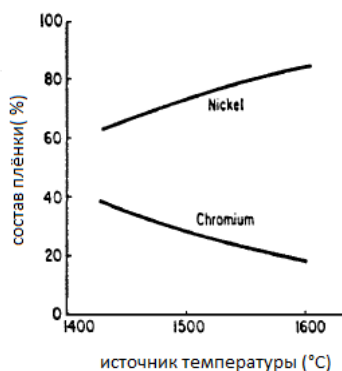


Рис. 18. Состав вакуумной осажденной никромовой пленки по сравнению с температурой источника, начиная с 80% Ni, 20% Cr-смесью

Нихромные резисторы отжигаются на воздухе при температурах от 225 до 350 °С в течение нескольких часов. Отжиг в воздухе предполагает химическую реакцию, при которой более активный хром окисляется, образуя пассивирующий слой, который замедляет дальнейшее окисление и стабилизирует значения резистора. Как правило, при отжиге сопротивление поверхности изменяется (увеличивается) на 10–20%. В долгосрочной перспективе стабильность, дрейф сопротивления после старения 1 000 часов при 125–150 °С во многом зависит от используемого графика отжига; более высокие температуры и более длинные графики отжига обеспечивают тем более стабильные резисторы, более низкий ТКС и более точное отслеживание сопротивления (табл. 13). Некоторые распыленные нихромовые резисторы, отожженные при 350 °С в течение 4–5 часов, дрейфуют менее 100 ppm после 1 000 часов старения при 150 °С и имели ТКС $0 \pm 3 \text{ ppm/}^\circ\text{C}$.

Хотя нихромные резисторы являются одними из самых точных, термически устойчивых резисторов, они также относятся к числу наиболее подверженных химической и электролитической коррозии. Ионы хлора переносятся из отпечатков пальцев, в сочетании с влагой, способны разъедать и протравливать пленку из нихрома. Нихромовые резисторы в составе интегральных схем, которые были покрыты диоксидом кремния, исчезли. Это объясняется кислотным травлением, при котором фосфор, содержащийся в слое пассивации диоксида кремния, реагирует с влагой на образование фосфорной кислоты. Некоторые органические покрытия также будут взаимодействовать с нихромом, что приведет к изменению сопротивления. Поэтому любое нанесенное покрытие, органическое или неорганическое, должно оцениваться по значениям сопротивления, измеренных как зависимость от времени и температуры. Как правило, для применения в авиа и космических целях, нихромовые резисторы остаются без покрытия, потому что гибридные схемы,

содержащие их, герметично запечатывают азотом в металлических или керамических корпусах. Наиболее распространены резистивные сплавы РС (табл. 13).

Таблица 13. Свойства и состав резистивных сплавов

Свойство	РС-3710	РС-1004	РС-1747	РС-3001	РС-4206	РС-4800
Состав, %:						
Хром	37	—	17	30	42	48
Кремний	53	86	42	69	52	52
Железо	—	4	14	1	—	—
Вольфрам	—	—	27	—	—	—
Никель	10	10	—	—	6	—
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
$TKC10^{-4}$, 1/°С	2	1,5	5	3	2	2

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 $\text{ТКС} < 1 \cdot 10^{-4}$ 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.

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 $R_s = 40\text{--}50$ кОм/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 $\pm 2\%$, после 15 термоциклов ($-60 \dots +125$ °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. 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.

Таблица 14. Стабильность никель-хромового резистора

Осаждение Метод	Сопротивление поверхности NiCr, Ом/кв	Условия отжига (Воздух)		Изменение сопротивления (10 ⁻⁶), после старения			ТКС
				50 часов, N ₂	169 часов, N ₂	500 часов, N ₂	
		(°C)	(min)	150°C	125°C	125°C	
Испарение вспышкой без Ni барьерного слоя	165	225	120	2,000	500	700	-20
Испарение вспышкой с 400 Å Ni барьерным слоем	165	225	120	1,700	350	630	-16
Испарение вспышкой с 800 Å Ni барьерным слоем	165	225	120	1,400	280	400	-12
Испарение вспышкой с 800 Å Ni барьерным слоем	165	300	120	1,310	260	300	-10
Испарение вспышкой с 800 Å Ni барьерным слоем	165	350	120	460	70	110	+34
Распыление с 800 Å Ni барьерным слоем	125	350	235	71	41	—	+3

Дальнейшее ограничение нихромовых резисторов заключается в том, что реальный верхний предел для сопротивления поверхности низкое, порядка 200–300 Ом/кв. Более высокие сопротивления поверхности возможно получить путем осаждения сверхтонких слоев (гораздо меньше 100 Å), поскольку сопротивление поверхности обратно пропорционально толщине. Однако нецелесообразно наносить такие чрезвычайно тонкие слои, поскольку образуются прерывистые, дефектные пленки, приводящие к образованию отверстий и нестабильных резисторов. На рис. 19 показано изменение сопротивления поверхности с толщиной для двух напыленных композиций из нихрома.

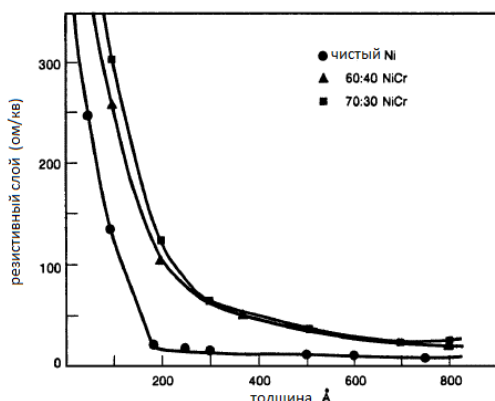


Рис. 19. Сопротивление поверхности из нихрома в зависимости от толщины пленки

Эти графики показывают, что сопротивление поверхности 100 Ом/кв является хорошим компромиссом. Хотя использование высоких сопротивлений поверхности уменьшит размер большинства схем, наклон кривой настолько крут в этом диапазоне, что воспроизводимость и устойчивость резистора будет плохо достижима. Высоко-

качественные резисторы с использованием материалов с низким сопротивлением поверхности, таких как нихром или нитрид тантала, могут быть спроектированы только с помощью площадью большого размера с небольшой шириной и изгибающимися проводниками для экономии пространства. Несмотря на это, конструкция резистора 100 кОм с 200 Ом/кв нихрома занимает значительное пространство (рис. 20). На практике, для многих тонкопленочных цепей число высокоомных резисторов невелико по сравнению с низкими и промежуточными значениями, и их можно заменить на чип-резисторы.

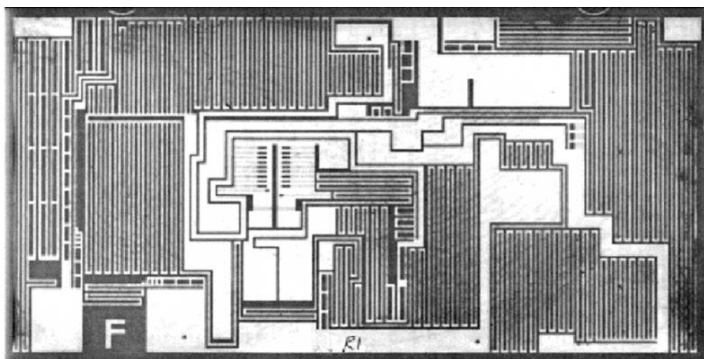


Рис. 20. Большое значение нихромовых резисторов (около 100 кОм)
(большие площади поверхности)

Технологический процесс тонкопленочных элементов на основе нитрида тантала. Процессы получения резисторов из нитрида тантала на керамике в целом аналогичны способам изготовления нихромовых резисторов. В обоих случаях используется фотолитография с избирательным травлением многослойной металлической структуры. Технологические отличия:

1. Нитрид тантала (TaN) осаждается методом реактивного распыления тантала в атмосфере азота, а не путем прямого распыления или взрывного испарения.

2. Титановый или палладиевый слой используются в качестве барьерного слоя, соответственно, между TaN и золотом; никель используется в качестве барьерного слоя с нимхромовыми резисторами.

3. Титан и TaN вытравлены раствором фтористоводородной кислоты и азотной кислоты или могут быть подвергнуты ионному травлению для очень тонких проводников.

Парциальное давление азота, вводимого во время реактивного распыления, влияет как на удельное сопротивление поверхности, так и на ТКС осажденных резисторов (рис. 21), поскольку нитрид тантала проходит через несколько кристаллографических форм при увеличении концентрации азота. Помимо этого периодического процесса осаждения TaN на подложках из оксида алюминия, резисторы TaN могут быть получены в виде чипов (smd). Пленки напыляют на полированные кремниевые, кварцевые или сапфировые пластины, после чего их вытравливают распылением, чтобы получить тонкие линейные резисторы с высокими значениями сопротивления (до 12 МОм).

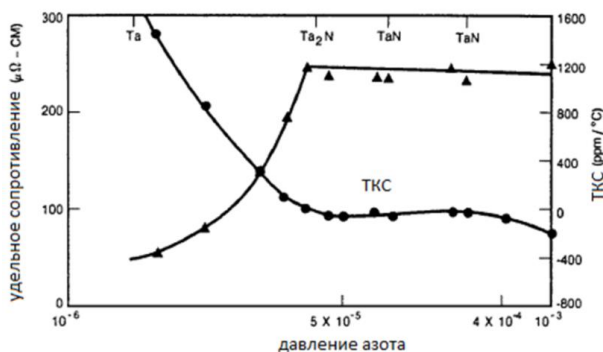


Рис. 21. Влияние парциального давления N_2 в камере распыления на удельное сопротивление и ТКС пленок Ta

Поперечные сечения чип-резисторов из нитрида тантала с двумя конструкциями приведены на рис. 22.

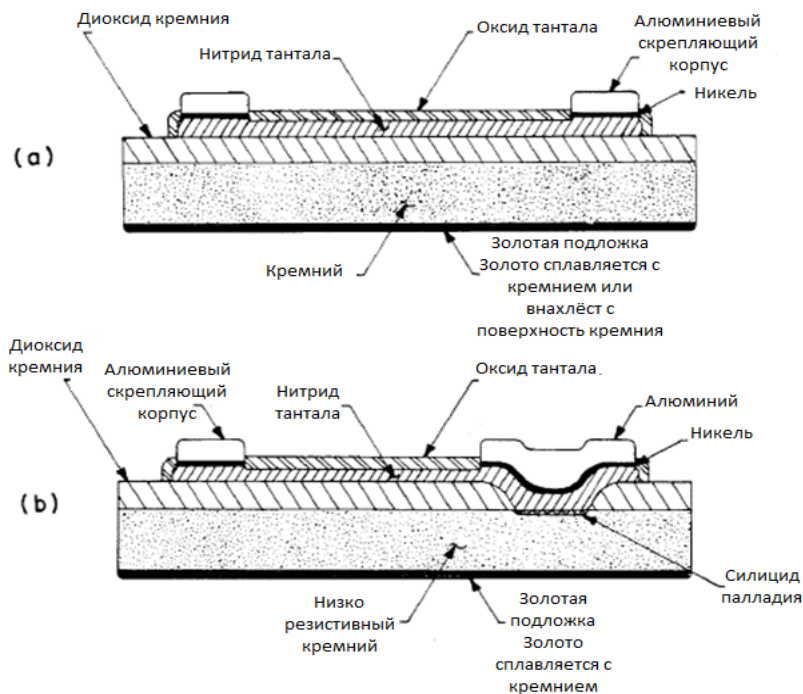


Рис. 22. Поперечное сечение верхнего контакта (а) и нижнего контакта (b) чип-резистора из нитрида тантала

3.5. Технологические процессы на основе пленок нитрида тантала

Резисторы из нитрида тантала аналогичны резисторам никрома по своим электрическим свойствам, включая диапазон сопротивления поверхности, ТКС, отслеживание сопротивления и долговременный дрейф сопротивления после повышения температуры. Некоторые электрические характеристики приведены в табл. 15.

Резисторы из нитрида тантала являются более прочными и более химически и термически устойчивыми, чем нихромовые резисторы. Пассивирующий слой пентаоксида тантала (Ta_2O_5) образуется путем отжига резисторов на воздухе или в кислороде или путем введения контролируемых количеств кислорода в процессе реактивного распыления. Отжиг проводят при $450\text{ }^\circ\text{C}$ или выше. Этот заложенный оксид довольно устойчив к влаге и другим агрессивным средам.

Таблица 15. Свойства резисторов TaN

Поверхностное сопротивление	20–150 ом/кв, 100 ом/кв (типичный)
Поверхностное сопротивление допуск	$\pm 10\%$ от нормального значения
ТКС	$-75 \pm 50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (типичный). $0 \pm 25 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ с вакуумным отжигом
ТКС следящий*	$<2 \text{ ppm}$
Сопротивление дрейфа (1, 000 часов при $150\text{ }^\circ\text{C}$ в воздухе)	$<1,000 \text{ ppm}$
Отслеживание коэффициентов	$5 \cdot 10^{-6}$
Допуск резистора после отжига, лазерной подгонки	
	$\pm 0,10\%, \pm 0,03\%$
Шум (100 Гц – 1 МГц)	$<-40 \text{ dB}$
Диапазон рабочих температур	* -55° to $125\text{ }^\circ\text{C}$

3.6. Металлокерамические тонкопленочные резисторы

Металлокерамика может быть на основе толстопленочных паст или на основе тонких пленок, которые пригодны для формирования резисторов с высокими значениями сопротивления. Наиболее широко используемые тонкопленочные металлокерамические резисторы представляют собой композиции монооксида кремния и хрома (SiO-Cr) и используются в основном из-за их высоких значений сопротивления поверхности и их способности образовывать высокоэффективные резисторы в минимальной площади подложки. Изменяя соотношение монооксида кремния и хрома, возможен широкий диапазон сопротивлений поверхности. Оксид кремния по своей сути является изолятором, поэтому, при увеличении количества монооксида в составе кремния, удельное сопротивление увеличивается. Может возникнуть сопротивление поверхности от нескольких сотен Ом/кв до десятков тысяч Ом/кв, однако трудно контролировать стабильность и воспроизводимость резисторов с высоким сопротивлением. Наиболее практичный диапазон составляет от 1 000 до 3 000 Ом/кв. Взаимосвязь между составом и сопротивлением для металлокерамических пленок от 900 до 1 750 Å толщиной показана на рис. 23. Таким образом, для указанной толщины пленок, при производстве резисторов с удельным сопротивлением 1 000 Ом/кв, требуется состав, содержащий 60% SiO.

Металлокерамические пленки лучше всего наносить при помощи взрывного испарения или распыления. При испарении вспышки металлокерамический порошок опускается в лодочку с танталом, поддерживаемую при температуре выше температуры испарения любого из металлокерамических составляющих. Способ изготовления образца металлокерамического резистора-проводника для подложки с гибридной схемой аналогичен процессу для

резисторов из нихрома или нитрида тантала. В одной последовательности сначала формируется «сэндвич» или слоистая структура SiO-Cr, палладия и золота. Палладий служит барьерным слоем. Затем наносится фоторезист, подвергается облучению для формирования проводящей схемы; излишки золота химически вытравливаются с использованием стандартного раствора йодида калия. Затем применяется композитный фоторезист. Палладий вытравливают, затем металлокерамика обрабатывается раствором азотной кислоты. На последнем этапе фоторезист применяется для маскировки и защиты всех областей, кроме тех, которые должны стать резисторами.

ТКС для металлокерамических резисторов, как правило, отрицательны, становясь более отрицательными по мере увеличения содержания оксида. Для металлокерамической композиции 70% Cr / 30% SiO зафиксированы ТКС от -60 до -40 ppm/°C.

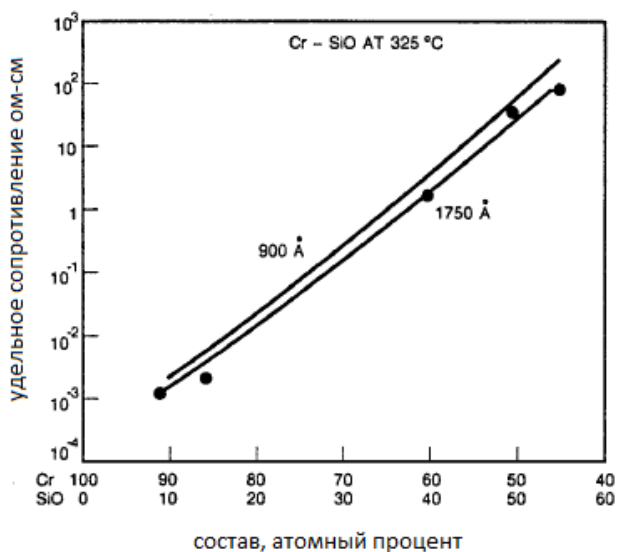


Рис. 23. Сопротивление монооксида хрома и кремния в зависимости от состава

4. Фоторезисты и их технологические процессы

Фотолитография – совокупность фотохимических процессов, применяющихся для получения необходимых размеров и конфигурации элементов интегральных микросхем и других электронных микроузлов.

Сущность процесса фотолитографии заключается в следующем.

На поверхность материала наносят слой особого свето-чувствительного состава – фоторезиста. **Фоторезисты (ФР)** – светочувствительные и устойчивые к воздействию агрессивных сред (кислот, щелочей) вещества, предназначенные для создания защитного рельефа требуемой конфигурации от последующего воздействия химических, физических, электрохимических и прочих агрессивных сред. Защитный рельеф образуется в результате того, что под действием света, падающего на определенные участки фоторезистного слоя, последние изменяют свои физико-химические свойства.

В зависимости от механизма протекающих в фоторезисте реакций, особенностей, и изменения его свойств, фоторезисты делят на негативные и позитивные. При облучении **негативного фоторезиста** через фотошаблон (позитив) в нем протекают процессы, приводящие к потере растворимости, в результате чего после обработки в соответствующих растворителях (проявителях) удаляются только необлученные участки, расположенные под непрозрачными элементами фотошаблона, и на подложке образуется защитный рельеф, повторяющий негативное изображение фотошаблона.

В позитивных фоторезистах под действием света протекают фотохимические реакции, приводящие, наоборот, к усилению растворимости в соответствующих проявителях, в результате чего удаляются (вымываются) только облученные участки фоторезиста и защитный рельеф повторяет позитивное изображение фотошаблона.

К основным достоинствам фотолитографического процесса следует отнести:

- возможность получения пленочных и объемных компонентов ИМС весьма малых размеров (до долей микрона) практически любой конфигурации;

- универсальность метода (изготовление трафаретов для напыления пленок и сеткографии, селективное травление пленочных слоев, вытравливание «окон» в оксидных пленках для локальной диффузии, эпитаксии и имплантации, глубинное травление в полупроводниковых и диэлектрических подложках и т.д.);

- возможность применения групповой технологии (за одну операцию и на одном виде оборудования можно получить сотни и тысячи элементов ИМС и других приборов).

Для осуществления фотохимических процессов в фоторезистных материалах применяют обычно ультрафиолетовое (УФ) излучение. Поскольку в естественном свете содержание УФ лучей сравнительно невелико, то для более интенсивного протекания фотохимических процессов применяют искусственные источники УФ излучения. Поглощение УФ излучения органическими молекулами протекает селективно, т.е. для различных веществ поглощение наблюдается на вполне определенной длине волны УФ диапазона.

Процессы, протекающие при экспонировании вещества, разделяют на три группы:

- Фотополимеризация и образование нерастворимых участков; наиболее типичными для системы, в которой используется этот процесс, являются негативные фоторезисты – эфиры коричной кислоты и поливинилового спирта.

- Сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений, использование каучуков с добавками светочувствительных веществ, таких, например, как бисазиды, дает возможность получать исключительно кислотостойкие негативные фоторезисты.

- Фотолиз светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ. Примером служит большинство современных фоторезистов, в которых фотолиз соединений, называемых нафтохинондиазидами (НХД), приводит к тому, что облученные участки становятся растворимыми в щелочных составах.

В точной фотолитографии предпочитают использовать позитивные ФР в связи с отсутствием ореолов по границам защитного рельефа. Позитивные ФР проявляют в растворах с основными свойствами (в качестве проявителя часто используется водный раствор тринатрий-фосфата). Помимо разрушенных молекул НХД проявитель должен растворять и полимер, поэтому с целью снижения числа дефектов на незасвеченных участках желательно время воздействия проявителя на слой фоторезиста сокращать до минимума. Для этого необходимо работать на нижнем пределе экспонирования, который определяется условием достижения максимальной скорости проявления экспонированных участков по экспериментальным кривым (рис. 24).

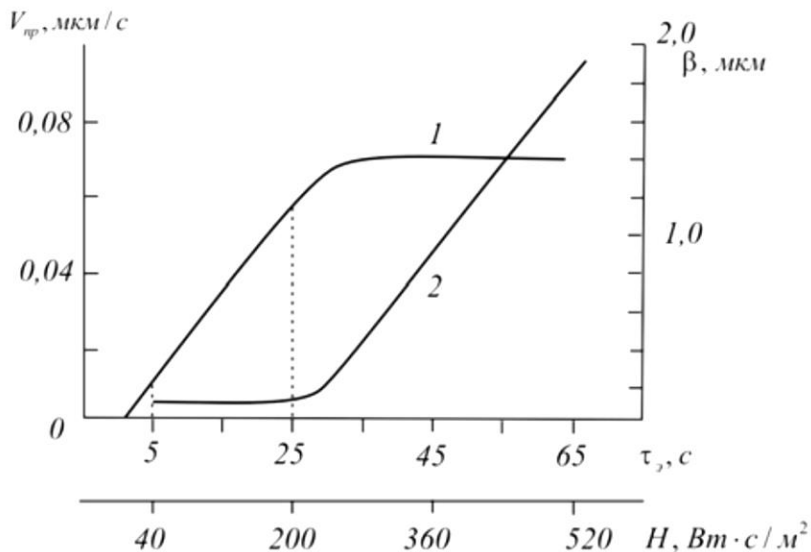


Рис. 24. Характеристическая кривая и погрешность в воспроизведении размеров элементов после проявления: 1 – зависимость скорости проявления от экспозиции; 2 – зависимость погрешности от экспозиции $V_{\text{пр}} = h_c / t_{\text{пр}}$, где $t_{\text{пр}}$ – время полного растворения слоя толщиной h_c , получившего дозу излучения $H = E \tau_3$; E – плотность светового потока, $\text{Вт} / \text{м}^2$; τ_3 – время экспозиции, с.

Получение конфигурации тонкопленочных элементов методом фотолитографии

Типовой технологический процесс фотолитографии в общем виде представлен схемой (рис. 25).

Нанесение фоторезиста на подложку осуществляют:

1. Центрифугой при частоте вращения до 10 тыс. об/мин. Метод обеспечивает получение тонких, равномерных покрытий толщиной до 1 микронметра с отклонением до 5%. В промышленности выпускается агрегат для нанесения и сушки фоторезиста типа Э12 К631.

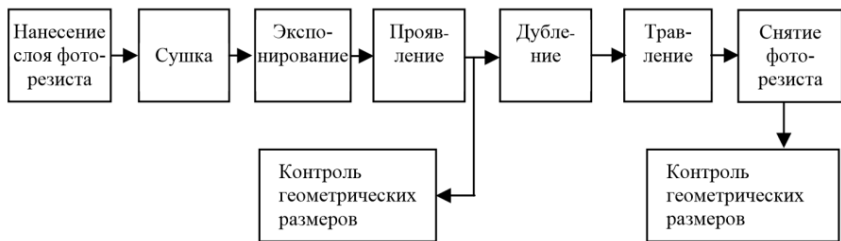


Рис. 25. Схема фотолитографического процесса

2. Распылением фоторезиста в обеспыленной среде под давлением. Размер частиц, поступающих на подложку, не превышает 1,5–2 мкм. Метод обеспечивает нанесение слоя в интервале от 0,3 до 10 мкм с допуском $\pm 5\%$.

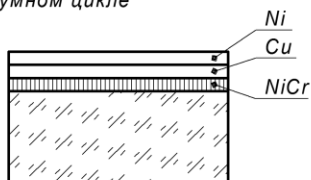
3. Погружением подложки в ванну с фоторезистом. Однако толщина пленки на подложке неравномерна и имеет форму «клина» за счет стекания фоторезиста в сторону, противоположную вытягиванию подложки из ванны.

Для удаления остатков растворителя из пленки фоторезиста проводят сушку, при которой адгезия между подложкой и фоторезистом увеличивается. Формируется конфигурация в пленке фоторезиста экспонированием, при котором изображение с фотосаблона переносится на поверхность подложки, покрытой слоем фоторезиста.

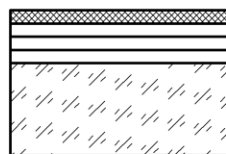
Фоторезист проявляют, погружая в раствор или выдерживая в парах проявителя. Время проявления определяется толщиной фоторезиста и регулируется таким образом, чтобы по всей площади подложки полностью был удален **проэкспонированный** растворимый фоторезист.

Последовательность операций при изготовлении тонкопленочного резистора методом фотолитографии.

1. Нанесение сплошных пленок никрома, меди и никеля в непрерывном вакуумном цикле



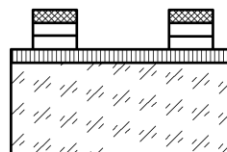
2. Нанесение фоторезиста



3. Экспонирование рисунка через шаблон Ш1, проявление и термообработка фоторезиста, снятие фоторезиста в диоксане.



4. травление никеля и меди в азотной кислоте,



5. снятие фоторезиста в диоксане

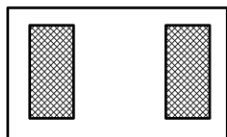
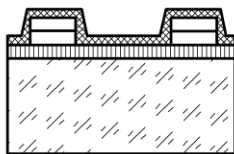
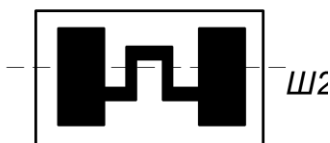


Рис. 26. Последовательность операций при изготовлении тонкопленочного резистора (операции 1–5)

6. Нанесение фоторезиста



7. Экспонирование рисунка через шаблон Ш2 проявление и термообработка фоторезиста, травление нихрома в соляной кислоте



8. снятие фоторезиста в диоксане.

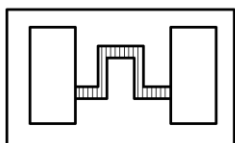
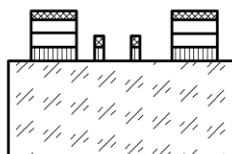
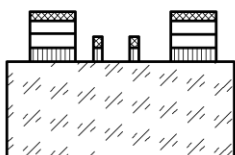


Рис. 27. Последовательность операций при изготовлении тонкопленочного резистора (операции 6–8)

Для получения оптимальных результатов, особенно при изготовлении очень тонких геометрических размеров, как для СВЧ или гибридных схем высокой плотности, необходимо тщательно отслеживать многие детали процесса. Параметры вращения, выпекания и экспонирования должны быть экспериментально определены и точно соблюдены для получения воспроизводимых точных геометрических размеров. Любые дефекты, пятна или другие недостатки

в затвердевших сопротивлениях становятся участками для проникновения травителей, что приводит к открытию или замыканию в схеме. Двумя основными причинами несовершенных сопротивлений являются аэрозольные частицы, находящиеся в воздухе, которые оседают на покрытие во время вращения, ориентации или экспонирования, а также загрязняющие частицы, содержащиеся в жидком сопротивлении. Эти источники частиц могут быть сведены к минимуму или полностью устранены путем обработки фоторезистов в ламинарной постоянной потоке класса 100 или выше и использования жидкого резиста, который был отфильтрован через сверхтонкий микропористый фильтр. Большинство фоторезистов можно приобрести предварительно отфильтрованным, чтобы удалить частицы размером 0,45 мкм или 0,2 микрон или больше, в зависимости от фильтра. Если резистор переносится из его первоначального контейнера, например, в очередь для нанесения покрытия, может потребоваться дополнительная фильтрация в пункте дозирования, так как частицы могут быть захвачены во время переноса.

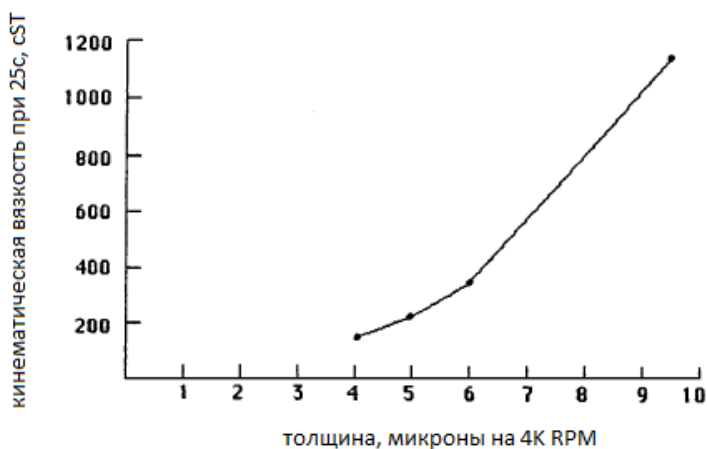


Рис. 28. Вязкость фоторезиста по отношению к толщине

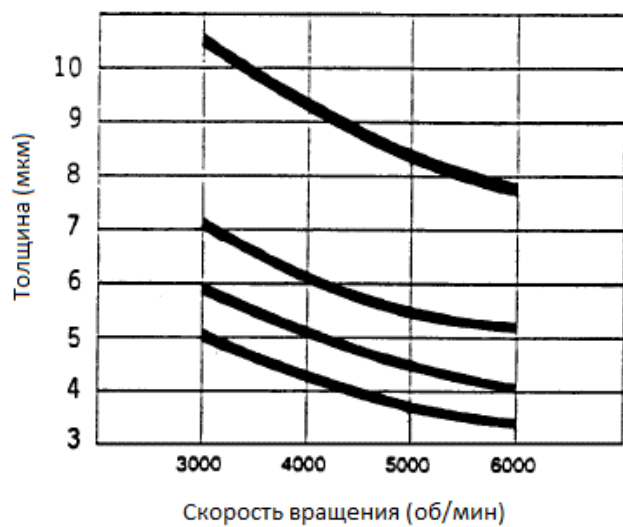


Рис. 29. Отношение скорости вращения к толщине фоторезиста

5. Многокристалльные модули

Основным преимуществом многослойных керамических структур является возможность монтажа полупроводниковых ИС на механически прочные герметичные подложки с низким значением линейного коэффициента теплового расширения и высокой теплопроводностью, что предоставляет богатые возможности для многоуровневой коммутации и корпусирования. На пассивную многослойную ИС могут устанавливаться элементы, изготовленные с применением других технологий: полупроводниковые приборы, монолитные интегральные схемы управления сигналом, микроэлектромеханические системы (МЭМС), перестраиваемые компоненты на основе сегнетоэлектрических материалов и др. Это позволяет создавать многофункциональные модули, выполненные на единой подложке. Компоновка на единой подложке (System-on-Chip – SoC) или в едином корпусе (System-in-Package – SiP) является самым быстроразвивающимся и перспективным направлением современной микроэлектроники.

Можно выделить пять основных типов подложек для изготовления МКМ, которые используются в настоящее время:

- **МКМ-L** – с подложкой из стеклотекстолита.
- **МКМ-C** – с подложкой из технической керамики (толсто пленочные БГИС). Изготавливаются на основе высокотемпературной и низкотемпературной керамики (НТСС, ЛТСС).
- **МКМ-D** – тонкопленочные структуры (например, на подложках из ситалла и поликора).

- **МКМ-Si** – тонкопленочные структуры с подложкой из кремния.

- **МКМ-A** – тонкопленочная структура на основе электрохимической алюмооксидной технологии (А – обозначает основную базовую операцию – анодирование) позволяет на едином оборудовании с использованием минимальных базовых операций (вакуумное напыление, фотолитография, анодирование, сборка) и при минимальной номенклатуры материалов (Al, Ta, Nb) изготовить алюминиевую подложку и многоуровневую систему межсоединений на базе алюминия и его оксидов Al_2O_3 .

Изначально многослойные керамические структуры разрабатывались на основе оксида алюминия с небольшими добавками связующих материалов. В качестве проводящих слоев применялись тугоплавкие металлы – вольфрам, молибден или молибден–марганец. Многослойная керамическая структура обжигалась при температурах 1 500...1 800 °С, за что впоследствии материал получил название керамики с высокой температурой обжига (HTCC – high temperature co-fired ceramics). Около 20 лет назад вместо оксида алюминия в качестве керамической основы стали применять стекло, температура обжига уменьшилась до 1 000 °С и ниже, что позволило использовать в составе многослойной структуры материалы с низким удельным сопротивлением на основе золота, серебра или меди.

Такая комбинация, получившая название керамики с низкой температурой обжига (LTCC – low temperature co-fired ceramics), открывает широкие возможности для применения многослойных керамических ИС в высокочастотном и сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазонах. Многослойная LTCC-структура позволяет выполнять пассивные элементы ИС с высокой плотностью компоновки за счет их размещения в нескольких слоях с переходом к трехмерной (объемной) ИС. Значительно лучшие показатели новых керамических материалов в СВЧ-диапазонах (на частотах до 80–100 ГГц)

предоставляют возможность не только значительно увеличить быстродействие ранее созданной элементной базы, но и позволяют создать новые изделия для СВЧ-приложений, отличающиеся высокой надежностью, минимальными массо-габаритными характеристиками.

Таблица 16. Сравнение основных технологий изготовления МКМ

Параметр	МКМ-С			МКМ-D		МКМ-L
	Тонкопленочные	ЛТСС (низкотемпературная)	НТСС (высокотемпературная керамика)	Неорганический диэлектрик на кремнии	Органический диэлектрик на кремнии	
ε	9–10	5	9	3,6–4	2,4–4	3,5–5
Загущение на частоте 1 МГц	0,0004	0,001–0,01	0,001–0,01	0,03–0,3	0,002–0,006	0,02–0,03 (текстолит) 0,01–0,015 (полиимид)
Металлизация	Au, Cu, Pt-Au, Pt-Ag, Pd	Au, Cu	Mo, W	Al	Cr/Cu/Cr Cr/Cu/Au	Cu/Ni/Au
ТКЛР 10Е-6 /К	7,1	3.5	7	2,3	2,3	14–70 (текстолит) 12–40 (полиимид)

Окончание табл. 16. Сравнение основных технологий изготовления МКМ

Пара-метр	МКМ-С				МКМ-D		МКМ-L
	Тонкопленочные	LTCC (низко-темпера-турная керамика)	HTCC (высокотемпера-турная керамика)		Неорганический Диэлектрик на кремнии	Органический диэлектрик на кремнии	
Тепло-про-водность (Вт/м* К)	26	1–5	15–20		145(Si) 0,1–1,0	145(Si) 0,01–0,1 Полиимид	1–2

Характеристики подложек, применяемых в МКМ, приведены в табл. 17.

Таблица 17. Материалы подложек для микросборок

Материал подложки	Плотность проводников, линий/мм		ТКЛР, 10^{-6} л/К	Удельная теплопроводность, Вт/(см-К)	Длина и ширина, мм	Предел прочности, МПа	Удельная цена, руб./см	Плотность, г/см ³
	до-стиг-нутая	пер-спек-тивная						
Стекло-текстолит FR-4	5	10	14	0,02	500x500	300–400	0,1	1,8
Полиимид	5	10	25	0,0015	78x95	–	–	–

Окончание табл. 17. Материалы подложек для микросборок

Ситалл	5	20	5	0,015	60х48	200–300	1,14	2,5
Поликор	5	20	8	0,3	60х48	320–450	7,98	4
Сапфир	10	500	8	0,47	d 76	700	24,0	4
Кремний	50	500	2,3	1,09	d 100	700	2,4	2,3

Одним из вариантов изготовления многокристалльных модулей является использование многослойный разводки с полиимидным лаком на жестком основании и включает: формирование первого уровня разводки на основе тонкопленочного слоя меди; создание изолирующего слоя путем нанесения полиимидного лака; формирование окон под контактные переходы; формирование конфигурации элементов второго уровня разводки (рис. 30). Лак 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.

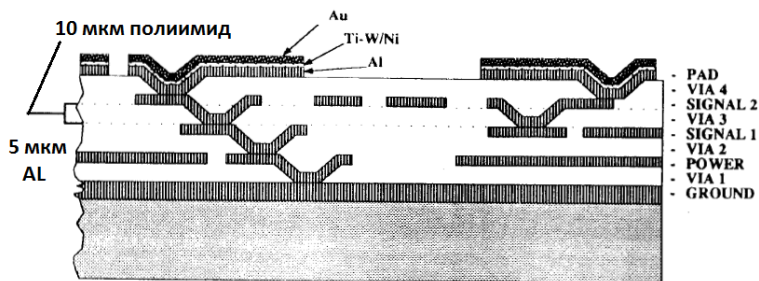


Рис. 30. Конструкция многокристальной коммутационной платы высокой плотности (HDMI – High density Multichip interconnect)

Рис. 31 – Конструкция многокристальной коммутационной платы с диоксидом кремния в качестве межслойной изоляции. В данной технологии в качестве подложки используются кремниевые пластины, производство которых налажено при производстве полупроводниковых ИМС. Данный материал отличной высокой теплопроводностью и высоким качеством поверхности.

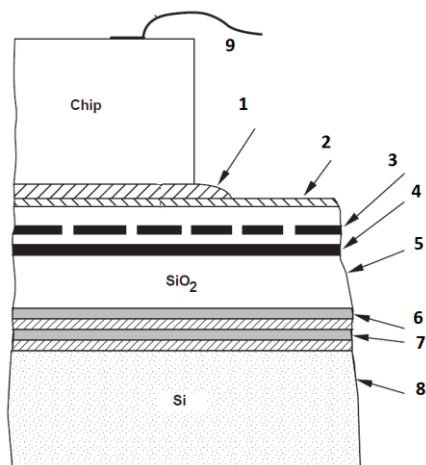


Рис. 31. Конструкция многокристальной коммутационной платы с диоксидом кремния в качестве межслойной изоляции

1 – теплопроводящий клей; 2 – защитный слой (нитрид кремния); 4 – сигнальный слой (напыленный Al, или электроосажденный Cu); 5 – диэлектрик SiO₂ (до 20 мкм); 6, 7 – шины питания и земли; 8 – подложка; 9 – проволочный вывод

На рис. 32 приведена конструкция многокристальной коммутационной платы, выполненной по технологии «Chip-first». В этой технологии используется подложка из алюминия с фрезерованными карманами, в которые устанавливаются (приклеиваются) бескорпусные интегральные микросхемы. Затем, с помощью диэлектрических слоев на основе полиамидной пленки и проводящих слоев формируется многоуровневая коммутационная разводка. Последовательность технологических операций показана на рис. 33. Данная технология позволяет создавать микросборки с высокой рассеиваемой мощностью, поскольку обеспечивается прямой тепловой контакт ИМС и теплопроводящего основания.

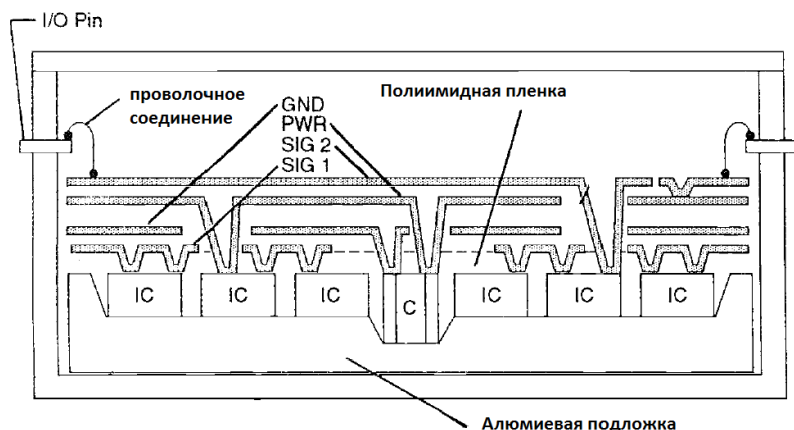


Рис. 32. Конструкция многокристальной коммутационной платы, выполненной по технологии «Chip-first»

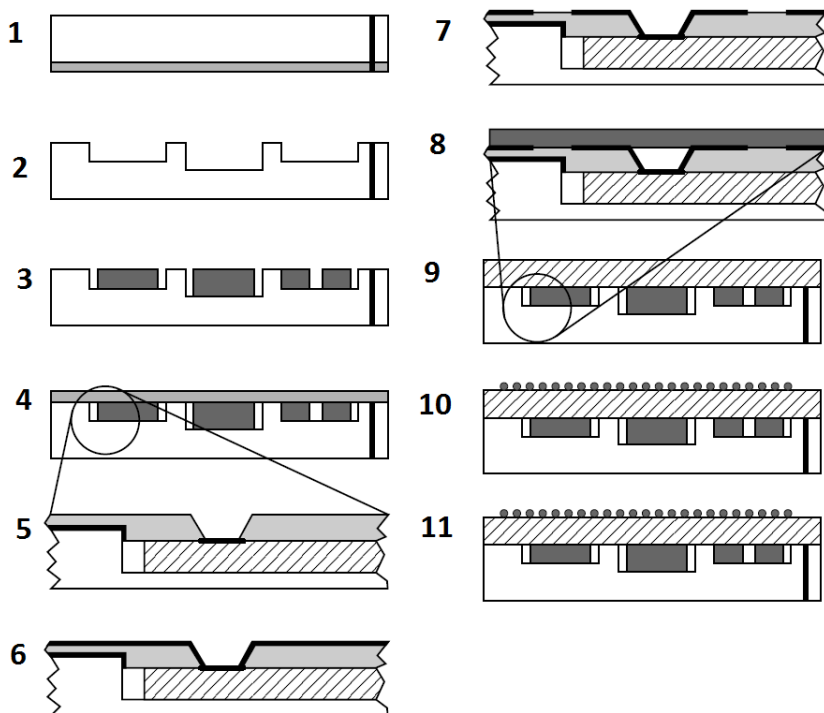


Рис. 33. Техпроцесс изготовления БГИС по технологии «chip first»:

- 1 – изготовление подложки; 2 – фрезерование карманов в подложке;
 3 – установка и закрепление кристаллов; 4 – покрытие полиамидной пленкой;
 5 – лазерный прожиг отверстий; 6 – напыление титана или электроосаждение меди;
 7 – лазерная проявка фоторезиста и травление слоя металлизации;
 8 – нанесение диэлектрического слоя; 9 – нанесение паяльной маски;
 10 – установка шариков из припоя; 11 – оплавление шариков

На рис. 34 показан техпроцесс изготовления МСБ в пластиковом корпусе. Данная технология подходит для изготовления недорогих МСБ с малым тепловыделением, поскольку пластик плохо отводит тепло от активных элементов.

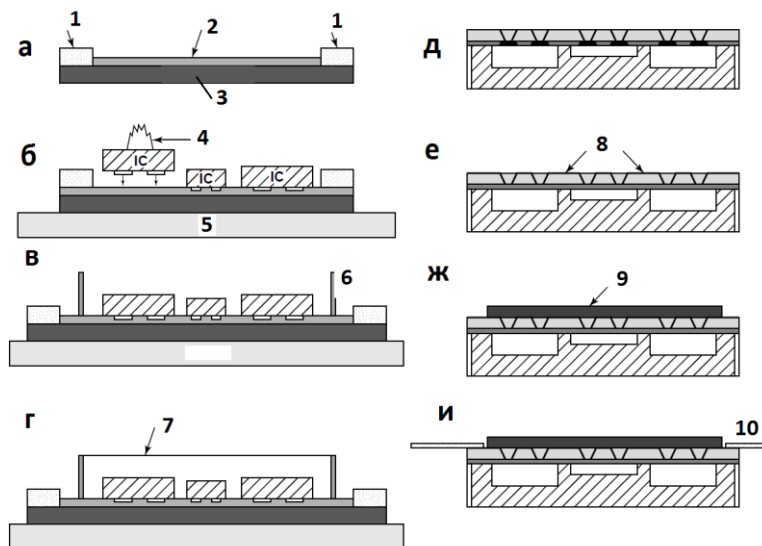


Рис. 34. Техпроцесс изготовления ГИС в пластиковом корпусе:
 а – крепление полиимидной пленки на каркасе; б – установка чипов рабочей стороной вниз на адгезивный слой; в – установка пресс-формы; г – заливка в форму жидкой пластмассы и отверждение; д – удаление подложки и формирование отверстий; е – формирование металлизации на поверхности и в отверстиях; ж – добавление защитного слоя; и – присоединение рамки с выводами;
 1 – каркас; 2 – адгезионный слой; 3 – полиимидная пленка; 4 – позиционирование и установка чипов; 5 – монтажный стол; 6 – пресс-форма; 7 – отверждаемый пластик; 8 – металлизация; 9 – защитный слой; 10 – рамочный вывод

Маршрут производства толсто пленочных МСБ с многоуровневой разводкой на многослойной керамической подложке. Изготовление многослойных керамических оснований состоит из нескольких этапов (рис. 35): изготовления керамических

пластин; формирования пленочных 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 необоженная подложка подгоняется под нужный внешний размер и затем подвергается длительному циклу обжига, во время которого происходит постепенный нагрев до максимальной температуры 1560 °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. 35. 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 под-

ложка 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 выполняется детальная проверка 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение плотности упаковки элементов и компонентов, а также повышение требований к надежности требует применения новых материалов и подходов к конструированию в современной микроэлектронной аппаратуре. Решением этой задачи является создание микросборок, гибридных функциональных устройств, а также систем в корпусе, систем на кристалле и многокристалльных модулей. При этом базовые процессы тонко- и толсто пленочной технологии, известные с середины XX века, получают новое развитие для создания многоуровневых коммутационных плат с высокой плотностью проводников, которые приходят на замену традиционным печатным платам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Licari James J., Enlow Leonard R. Hybrid Microcircuit Technology Handbook: Materials, Processes, Design, Testing and Production, 2nd Edition. Noyes Publications, 1998, 579 pages.

5. Коледов, Л. А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок / Л. А. Коледов. – Москва: Лань, 2008. – 400 с.

2. Bogatin, E., Roadmaps of Packaging Technology, Scottsdale, AZ: Integrated Circuit Engineeering Corporation, 1997, 548 pages.

3. Daryl Ann Doane, Paul Franzon. Multichip Module Technologies and Alternatives: The Basics. Springer; 1993rd edition, 907 pages.

4. Бондаренко, О. Е. Конструктивно-технологические основы обеспечения качества микросборок / О. Е. Бондаренко, Л. М. Федотов. – Самара: СГАУ, 1999. – 231 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. Симин, А. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига / А. Симин, Д. Холодняк, И. Вендик // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. – С. 190–196.

7. Панфилов, Ю. Нанесение тонких пленок в вакууме. Технологии электронной промышленности / Ю. Панфилов. – 2007. – № 3.

Учебное издание

*Калаев Михаил Павлович,
Телегин Алексей Михайлович*

**ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
МИКРОСБОРОК И ГИБРИДНЫХ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие

В авторской редакции
Компьютерная верстка *А.С. Никитиной*

Подписано в печать 25.12.2020. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 6,25.

Тираж 120 экз. (1-й з-д 1–25). Заказ .

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.

