

Министерство образования и науки Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

М.Ф. ЖАРКОЙ

**ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ
ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЫ**

ЧАСТЬ 1

Учебное пособие.

**Санкт-Петербург
2008 г.**

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Введение. Основные термины и определения. Классификация интегральных схем по конструктивно-технологическим признакам....	
2. Конструктивно-технологические основы тонкоплёночной и толстоплёночной микроэлектроники.....	
2.1. Подложки пленочных и гибридных интегральных схем.....	
2.2. Конструктивно-технологические особенности тонкоплёночных интегральных схем.....	
2.2.1. Методы получения тонких плёнок.	
Термическое вакуумное напыление.....	
Катодное, ионно-плазменное и магнетронное напыление.....	
Химическое осаждение металлов из парогазовой смеси.....	
2.2.2. Методы формирования тонкоплёночных структур.	
Масочный процесс.....	
Методы фотолитографии.....	
2.2.3. Пассивные элементы тонкоплёночных интегральных схем.....	
2.2.4. Параметры качества тонкоплёночных элементов, проблемы его обеспечения.....	
2.3. Конструктивно-технологические особенности толстоплёночных интегральных схем.....	
2.3.1. Технология получения толстоплёночных элементов.....	
2.3.2. Пассивные элементы толстоплёночных интегральных схем.....	
2.3.3. Технологические погрешности и контроль качества толстоплёночных сопротивлений.....	
2.4. Пленочные микрополосковые структуры микросборок СВЧ диапазона.....	
Библиографический список.....	

1. ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы конструирования и производства изделий микроэлектронной аппаратуры» является одним из элементов конструкторско-технологического цикла, включающего в себя: конструкционные и электрорадиоматериалы, технологию конструкционных материалов, основы технологии приборостроения, АСТПП и САПР ТП, конструирование и производство типовых приборов и устройств, метрологическое обеспечение приборостроительного производства, обеспечение качества и сертификация изделий и производств.. Общей задачей цикла является формирование у студентов четкого представления о современном состоянии проектирования и производства изделий приборостроения, о требованиях по качеству и конкурентоспособности типовых приборов и устройств и в том числе интегральных микросхем (ИС), а также методы достижения этих требований.

Информационно-измерительные и управляющие функции современных приборов и систем управления определяются достижениями в областях конструирования и технологии электромеханических устройств, мехатронных изделий и ИС. Это и определяет необходимость и важность данного курса, его цели и задачи.

Основной целью курса является формирование представления о конструктивных и технологических решениях, используемых при создании основной элементной базы современных типовых приборов и устройств – интегральных микросхем, о требованиях по их качеству и проблемах его обеспечения.

Данное учебное пособие, состоящее из двух частей, является основной частью комплекса из следующих учебно-методических работ: «Конструирование микросборок»[7], «Конструирование и производство типовых приборов и устройств микроэлектроники: лабораторный практикум»[14], «Методика автоматического расчёта на базе программы LanVar пассивных элементов тонкоплёночных микросборок»[15].

В первой части учебного пособия рассмотрены конструктивно-технологические основы тонко- и толсто пленочных ИС, вопросы их качества.

Во второй части представлены технологические основы производства полупроводниковых ИС, сборка и герметизация ИС, контроль и управление качеством на соответствующих этапах производства.

Основные термины и определения

Микроэлектроника - это раздел электроники, охватывающий исследование, разработку (конструирование), изготовление и применение микроэлектронных изделий.

Микроэлектронное изделие - электронное устройство с высокой степенью миниатюризации.

Микроэлектронные изделия малогабаритной электронной аппаратуры подразделяются на три группы (рис. 1.1) [5]:



Рис. 1.1 Классификация микроэлектронных изделий

Из перечисленных изделий микроэлектроники интегральные микросхемы являются основной элементной базой для реализации соответствующих аппаратных функций, и именно микросхемы характеризуют современный уровень микроэлектроники.

Для микросхем наиболее распространена классификация по конструктивно-технологическим признакам [5] показанная на рис.1.2.

Интегральные микросхемы (ИС) – микроэлектронные изделия, выполняющие определенные функции преобразования и обработки сигналов, имеющие высокую плотность упаковки электрически соединённых элементов или элементов и компонентов, которые с точки зрения испытаний, приёмки, поставки и эксплуатации рассматриваются как единое целое. Интегральная микросхема содержит элементы и компоненты.

Элементом интегральной схемы называют часть ИС, реализующую функцию какого-либо электрорадиоэлемента (ЭРЭ): резистора, конденсатора, диода или транзистора. Эта часть схемы выполнена нераздельно от кристалла или подложки.

Компонентом ИС называют часть ИС, реализующую функцию ЭРЭ, но являющуюся самостоятельным изделием в специальной упаковке.

По способу изготовления и структуре различают полупроводниковые и плёночные ИС. Полупроводниковой ИС называется микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в объёме и на поверхности полупроводника. Плёночной ИС называется микросхема, все элементы и межэлементные соединения которой выполнены в виде тонких плёнок, нанесённых на поверхность диэлектрической подложки. В зависимости от способа нанесения плёнок, а, следовательно, и их толщины различают тонкоплёночные и толстоплёночные ИС.

Гибридные ИС (ГИС) представляют собой комбинацию пассивных плёночных элементов и дискретных активных (навесных) компонентов, выполненных на общей диэлектрической подложке.

Частным случаем ГИС является многокристальная ИС.

Микросборка (МСБ) – микроэлектронное изделие типа ГИС, выполняющее определённую функцию и состоящее из элементов, компонентов и (или) интегральных схем (корпусных и бескорпусных) и других радиоэлементов в различных сочетаниях, разрабатываемая и изготавливаемая разработчиками конкретной электронной аппаратуры для улучшения показателей её миниатюризации.

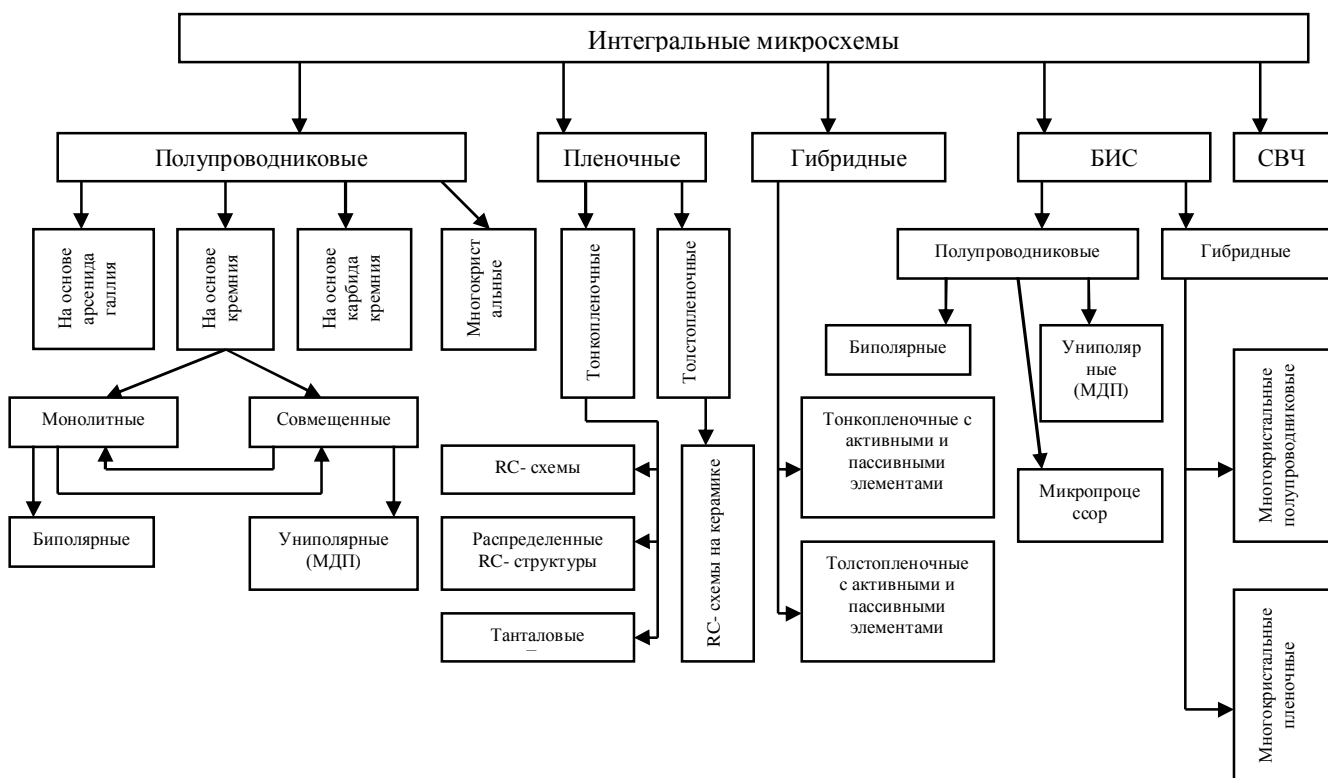


Рис. 1.2 Классификация интегральных микросхем по конструктивно-технологическим параметрам

В отличие от ГИС, представляющих собой законченные изделия общего применения, МСБ является изделием на уровне полуфабрикатов, т.е. является микроэлектронным изделием частного применения.

Большая интегральная схема (БИС) - полупроводниковая ИС, имеющая многоуровневую конструкцию элементов с высокой степенью интеграции. Степень интеграции – это показатель степени сложности ИС, характеризуемый числом содержащихся в ней элементов и компонентов. Определяется формулой $K = \lg N$, где K - коэффициент, определяющий степень интеграции, округляемый до ближайшего большего целого числа, N - число элементов и компонентов, входящих в ИС. При $K > 3$ микросхема относится к БИС.

Большая гибридная интегральная схема (БГИС) - ГИС с высокой степенью интеграции, имеющая, как правило, многоуровневую конструкцию компонентов и элементов.

Микропроцессоры (МП) — процессоры ЭВМ, выполненные на одном или нескольких кристаллах полупроводниковых ИС.

Совмещённые ИС - полупроводниковые микросхемы, у которых активные элементы выполнены в при поверхностном слое полупроводникового кристалла, а пассивные - нанесены в виде плёнок на изолированную поверхность того же кристалла. Создание совмещённых ИС позволяет повысить номиналы и стабильность резисторов и конденсаторов.

Подложка - заготовка, предназначенная для нанесения на неё элементов гибридных и плёночных ИС, межэлементных и (или) межкомпонентных соединений, а также контактных площадок.

Плата - часть подложки гибридной или плёночной ИС, на поверхности которой нанесены плёночные элементы ИС, межэлементные и межкомпонентные соединения, а также контактные площадки.

Разработка любых ИС представляет собой довольно сложный процесс, требующий решения разнообразных научно-технических проблем. Выбор конкретного технологического воплощения ИС делается с учетом особенностей разрабатываемой схемы, возможностей и ограничений, присущих различным способам изготовления, а также технико-экономического обоснования целесообразности массового производства. Эти вопросы находят решение путем использования основных классов микросхем – полупроводниковых, пленочных и гибридных. Эти классы могут иметь различные варианты структур, каждый из которых с точки зрения проектирования и изготовления обладает определенными преимуществами и недостатками. По своим конструктивным и электрическим характеристикам полупроводниковые и гибридные интегральные схемы дополняют друг друга и могут одновременно применяться в одних и тех же электронных комплексах.

При массовом выпуске различных ИС малой мощности используются, в основном, полупроводниковые ИС. Гибридные микросхемы заняли доминирующее положение в схемах с относительно большими электрическими мощностями, а также в устройствах СВЧ, в которых можно применять как толстопленочную технологию, не требующую жестких допусков и высокой точности нанесения и обработки пленок, так и тонкопленочную технологию для обеспечения нанесения пленочных элементов малых размеров.

Область применения заказных МСБ не ограничивается высокочастотными и сверх - высокочастотными изделиями. В частности американская компания АТС ТПП, являющаяся сертифицированным производителем заказных ГИС, изготавливает также целую гамму заказных высокопрецизионных тонкопленочных резистивных сборок и керамических рамок - носителей с высокой плотностью разводки для специальных БИС и СБИС.

2. КОНСТРУКТИВНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТОНКО - И ТОЛСТОПЛЕНОЧНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ.

В зависимости от способа формирования пленочных элементов пленочных и гибридных ИС существует тонко- и толстопленочная технология. Выбор типа конструкции пленочной и гибридной ИС и технологии их изготовления обусловлен как техническими параметрами схем и условиями эксплуатации, так и экономическими факторами.

При конструировании пленочных ИС и ГИС (МСБ) необходимо учитывать ряд особенностей и ограничений. Так диапазон номинальных значений пленочных резисторов, конденсаторов и индуктивностей значительно уже диапазона дискретных компонентов: снизу он ограничен требованиями к точности воспроизведения, сверху - допустимой площадью элемента поверхности подложки. Номинальные значения пленочных элементов находятся в следующих пределах [5,12]:

- резисторы от 1...5 Ом до 1 мОм;

- тонкоплёночные конденсаторы от 5 пФ до $100 \cdot 10^3$ пФ;
- толстоплёночные конденсаторы от 50 пФ до $10 \cdot 10^3$ пФ;
- катушки индуктивности от 0.01 по 5 мкГн.

Точность воспроизведения номинальных значений плёночных элементов в общем случае низкая и составляет (без подгонки):

- тонкоплёночные резисторы ± 10 %;
- толстоплёночные резисторы $\pm 20 \dots 50$ %;
- тонкоплёночные конденсаторы $\pm 15 \dots 20$ %;
- толстоплёночные конденсаторы $\pm 40 \dots 70$ %.

Малые размеры пленочных и гибридных ИС ограничивают рассеиваемую мощность резисторов и рабочее напряжение конденсаторов.

При выборе технологии производства пленочных ИС и ГИС (МСБ) также необходимо учитывать особенности конструктивно-технологического характера тонко- и толстоплёночных технологий (таблица 2.1).

На рис. 2.1 показаны графики зависимости уровня электрических шумов от величины сопротивления для тонкопленочных и толстопленочных резисторов. При сопротивлении приблизительно до 10 кОм уровень шумов остается почти постоянным, а затем начинает возрастать. Тем не менее, уровень электрических шумов у тонкопленочных резисторов существенно ниже, чем у их толстопленочных аналогов (более чем на порядок).

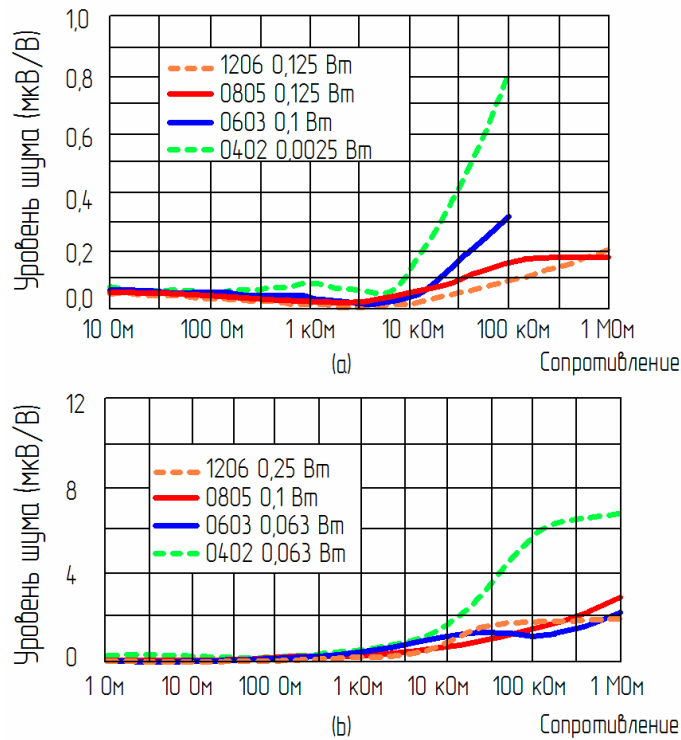


Рис. 2.1 Стандартный график зависимости уровня электрических шумов от сопротивления для тонкопленочных: (а) и толстопленочных (б) резисторов

Низкого температурного коэффициента сопротивления (ТКС) удается достичь вследствие того, что нихромовая пленка очень устойчива к изменениям окружающей температуры. Это резко контрастирует с толстопленочными резисторами, резистивная паста которых содержит серебро, что приводит к тому, что ТКС у этих резисторов составляет 50 ppm/К и выше. Графики ТКС толстопленочных и тонкопленочных резисторов представлены на рис.2.2

Стандартный тонкопленочный резистор имеет ТКС около 25 ppm/К, что существенно меньше, чем у толстопленочного резистора (50 ppm/К).

Таблица 2.1

Сравнение свойств и характеристик тонкопленочных и толстопленочных
резисторов

Параметры	Тонкопленочные резисторы	Толстопленочные резисторы
Стандартная точность	0,1%, 0,5%	1%, 5%
ТКС	25 ppm/K	100...250 ppm/K
Стабильность	Отличная	Хорошая
Рабочие характеристики на высоких частотах	Отличные	Хорошие
Уровень шумов	Низкий (см. рис. 2.1)	Средний
Воздействие 3 й гармоники (нелинейность)	Малое	Среднее
Отклонение сопротивления от номинала в зависимости от срока службы	0,1%	0,5%
Отклонение сопротивления от номинала в зависимости от колебания температуры	0,1%	0,2%
Стабильность после:		
- работы в течение 1000 ч	(0,5%+0,05 Ом)	(0,5%+0,1 Ом)
- кратковременной перегрузки	(0,5%+0,05 Ом)	(0,5%+0,05 Ом)
- резкого изменения температуры	(0,5%+0,05 Ом)	(0,5%+0,05 Ом)
- воздействия тепла и влаги	(0,5%+0,05 Ом)	(1,0%+0,05 Ом)
- перегрева	(0,5 %+0,05 Ом)	(0,5%+0,05 Ом)
Сопротивление изоляции	10 ⁴ МОм	10 ³ МОм
Сопротивление в условиях влажности	(0,5%+0,05 Ом)	(2%+0,1 Ом)

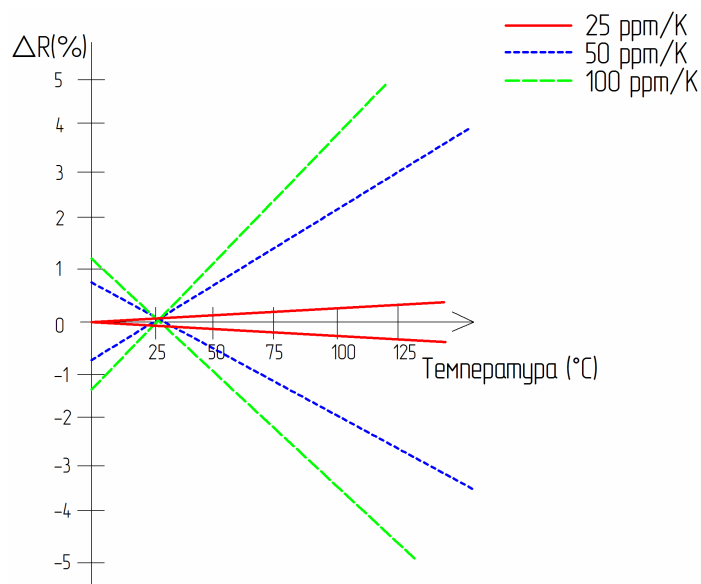


Рис. 2.2 Зависимость ТКС толстопленочных и тонкопленочных резисторов от температуры.

Таблица 2.2

Сравнение работы тонкопленочных и толстопленочных резисторов в цепи обратной связи регулятора напряжения в цепи питания процессора Pentium

Параметры	Тонкопленочные резисторы		Толстопленочные резисторы	
	Единичный резистор	Делитель напряжения	Единичный резистор	Делитель напряжения
Допуск	0,1%	0,2%	0,5%	1%
Отклонение сопротивления от номинала в зависимости от срока службы	0,1%	0,05%	0,5%	1%
Отклонение сопротивления от номинала в зависимости от колебания температуры	0,1%	0,05%	0,2%	0,4%
Суммарное отклонение	0,3%	0,3%	1,2%	2,4%

В таблице 2.2 показаны точностные параметры тонкопленочных и толстопленочных резисторов в цепях питания процессоров Pentium [17]. Сравнение показывает явное преимущество тонкопленочных резисторов, как в составе делителя напряжения, так и в простой цепи обратной связи с одним резистором.

Итак, преимущества тонкоплёночной технологии (по сравнению с толстоплёночной):

1. Более высокая стабильность номиналов элементов;
2. Более высокая плотность размещения элементов и проводников на подложке;
3. Возможность подгонки номиналов резисторов в процессе изготовления;
4. Простота функциональной подгонки всего устройства;
5. Низкий уровень шумов в плёночных элементах ($\leq 0,1 \text{ мкВ/В}$).

Таким образом, тонкопленочные резисторы имеют низкие паразитные параметры, низкий уровень электрических шумов и хорошие рабочие характеристики на высоких частотах. Все это позволяет использовать эти резисторы в системах электронной обработки данных (принтеры, материнские платы ПК, серверы, сканеры); в промышленном электрооборудовании (конверторы, испытательное и измерительное оборудование); в бытовой технике (аудиоусилители, тюнеры, жидкокристаллические дисплеи); в автомобильной электронике в системах управления двигателя [13].

Кроме того по сравнению с полупроводниковой технологией, тонкоплёночная технология обладает низкой стоимостью при высоком проценте выхода годных микросхем, меньшими затратами времени на их изготовление, широкой номенклатурой номинальных значений резисторов и конденсаторов с жёсткостью полей допусков.

Общие недостатки тонкоплёночной технологии (по сравнению с толстопленочной):

1. Ограниченное суммарное сопротивление определенной цепи схемы;
2. Ограниченная мощность рассеивания элементов;
3. Более высокая сложность технологических операций изготовления;
4. Большие затраты на организацию производства.

Относительно тонкопленочных ГИС СВЧ диапазона следует отметить проблемы, связанные с их применением:

- недостаточно высокая надежность,

- низкая воспроизводимость электрических параметров,
- большая трудоемкость сборочных операций.

Высокий процент технологических потерь при производстве и испытаниях ГИС СВЧ ведет к повышению трудозатрат. Кроме того, тепловые воздействия ускоряют окислительные процессы в тонких пленках и т.п.

Толсто пленочные ГИС (МСБ) заняли доминирующее положение в схемах с относительно большими электрическими мощностями, а также в устройствах СВЧ, в которых возможно применение толсто пленочной технологии не требующую жестких допусков и высокой точности нанесения и обработки пленок [14].

Наряду с изложенными ограничениями плёночная технология позволяет:

- плавно или дискретно изменять номинальные значения, что позволяет осуществлять функциональную доводку без применения традиционных компонентов, имеющих низкую надежность;
- реализовывать цепи с распределенными параметрами;
- реализовывать схемы, отличающиеся более высокой временной и температурной стабильностью по сравнению с аналогичными дискретными компонентами.

2.1. Подложки пленочных и гибридных интегральных схем.

Технология создания подложек с пленочными элементами находится в зависимости от их назначения. Например, плата для ГИС (МСБ) содержит в большинстве случаев пленочные элементы (резисторы, конденсаторы), контактные площадки и соединения, сформированные, как правило, в одном слое. Плата для гибридных БИС содержит в основном систему многослойных межкомпонентных соединений.

Классификация процессов изготовления плат пленочных и гибридных микросхем по тонко- и толсто пленочной технологии приведена на рис. 2.3 [5]:

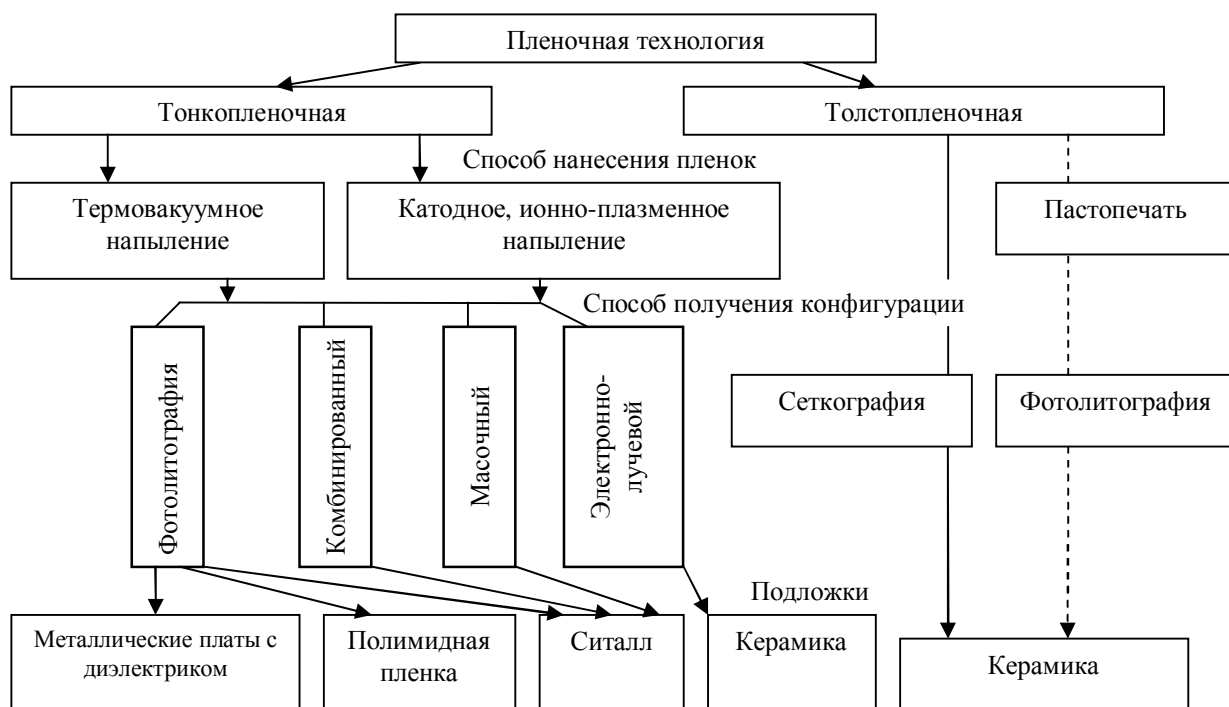


Рис. 2.3 Классификация процессов изготовления ГИС

К материалу подложек предъявляются требования, обусловленные конструктивным назначением, условиями эксплуатации и технологическими воздействиями, которым подвергаются подложки в процессе производства.

Материал подложек должен обладать высокой механической прочностью при малых толщинах, хорошими изоляционными свойствами (высоким поверхностным и объемным сопротивлением, малыми диэлектрическими потерями).

Особенности пленочной технологии накладывают дополнительные требования, предъявляемые к материалу подложек. К ним относится возможность получения групповых заготовок с гладкой и плоской рабочей поверхностью. Так для тонкопленочных ГИС (МСБ) чистота поверхности должна быть не менее 12 класса, для толстопленочных – в пределах 8 класса. Материал подложек должен в случае необходимости легко поддаваться шлифовке и полировке.

Материал подложек, кроме того, должен:

- допускать возможность резки групповых заготовок на отдельные пластины;

- обладать химической стойкостью при повышенных температурных воздействиях;
- иметь твердость, исключаящую появление царапин в процессе производства, транспортировки и хранения;
- обладать малым газоотделением в вакууме;
- быть температуростойким;
- быть недефицитным и иметь относительно малую стоимость.

Ни один из известных материалов в полной мере не удовлетворяет перечисленным требованиям, поэтому применяются в качестве подложек стекло, ситаллы и керамика, свойства которых лишь в той или иной степени соответствуют требуемым.

Стекло обладает хорошей полируемостью, низкой стоимостью, однако при малых толщинах характеризуется излишней хрупкостью. Кроме того стекла характеризуются низкой теплопроводностью, значительными в сравнении с керамикой диэлектрическими потерями, недостаточной химической стойкостью. Из стекол лучшими для подложек являются боросиликатные и алюмосиликатные сорта [4,5,7]. Кроме того, при повышенном нагреве применяется стекло марки «Пирекс», а также кварцевое стекло.

Наибольшее распространение в качестве материала подложек получили ситаллы – стеклокерамические материалы, получаемые путем термообработки стекла. Ситалл характеризуется высокой механической прочностью (в 2-3 раза прочнее стекла), влаго – и газонепроницаемостью; большей, чем у стекла теплопроводностью и химической стойкостью, высокой температурой тепловой деформации. Наиболее широко используемые марки ситалла приведены в [4,5,7].

В качестве материала подложек толстопленочных ИС используется керамика, отвечающая требованиям жаропрочности. По сравнению с ситаллами керамика обладает большей теплопроводностью, механической прочностью, малыми диэлектрическими потерями. К недостаткам керамики относится значительная шероховатость поверхности. Шлифование и полирование керамики уменьшают микронеровности, однако загрязняют поверхность и изменяют

свойства. Существенное снижение шероховатости достигается глазурованием поверхности тонким слоем бесщелочного стекла.

Для подложек толстопленочных ГИС повышенной мощности применяется керамика на основе окиси алюминия 22ХС «Поликор» и бериллиевая керамика, каждая из которых имеет свои особенности [3,4,5]. Например, для подложек ГИС, работающих в диапазоне СВЧ используется керамика «Поликор». Высокая твердость материала исключает возможность резки групповых заготовок, вследствие чего на одной подложке из «Поликора» формируется только одна микросхема.

Геометрические размеры подложек стандартизованы. Размеры подложек из стекла, ситалла и керамики приведены в [7]. Толщина подложек составляет 0,6 и 1,6 мм, непараллельность плоскостей не превышает 0,05 мм.

Безотходное деление подложек с ИС на части кратные 2 и 3, дает нормализованный ряд типоразмеров плат.

Кроме вышеуказанных материалов для изготовления ГИС (МСБ) применяют гибкие подложки из полиимидной пленки толщиной 40-50 мкм. Подобные подложки способны изгибаться и принимать форму корпуса сложной конфигурации, имеют высокую ударопрочность.

Для ГИС и БГИС применяют также металлические подложки, поверхность которых покрывают тонким (40-60 мкм) слоем диэлектрика. Это, например, алюминиевые пластины с анодированной поверхностью или стальные, покрытые стеклом или полиимидным лаком [3,4,5]. Металлические подложки улучшают теплоотвод от компонентов, обеспечивают повышенную жесткость конструкции ГИС (МСБ).

2.2 Конструктивно-технологические особенности тонкопленочных интегральных схем.

В конструктивном отношении тонкопленочная ГИС (МСБ) состоит из платы со сформированными пассивными пленочными элементами,

межэлементными и межкомпонентными соединениями, контактными площадками и смонтированными на ее поверхности активными компонентами. В качестве активных компонентов применяют бескорпусные навесные дискретные диоды и транзисторы, диодные и транзисторные матрицы, бескорпусные полупроводниковые микросхемы [5,7]. В тех случаях, когда необходима емкость конденсатора 2000 пФ и более, используют навесные керамические конденсаторы типов К10-9, К10-17, стеклокерамические К22-4, матрицы керамических конденсаторов К10-27, электролитические конденсаторы К53. Сущность тонкопленочной технологии заключается в том, что для реализации пленочных элементов и соединений тонкие пленки наносят вакуумными способами (термическим испарением; катодным, ионно-плазменным или магнетронным распылением), а необходимая конфигурация пленочных элементов и внутрисхемных соединений достигается с помощью масочного метода или метода фотолитографии, комбинации масочного метода и фотолитографии, а также метода электронно-лучевой гравировкой [5].

Дальнейшие этапы производства тонкопленочных ИС составляют цикл операций по сборке и защите ГИС (МСБ): разделение подложек, монтаж компонентов, сборка в корпус, корпусная или бескорпусная защита.

В последующих параграфах ограничимся рассмотрением только основных типовых процессов изготовления плат для ГИС (МСБ), т.к. вопросы сборки являются общими и для пленочных ГИС (МСБ) и полупроводниковых ИС.

2.2.1 Методы получения тонких пленок.

Многообразие методов получения тонких пленок объясняется многообразием используемых материалов для напыления, а также принятыми традициями фирм-изготовителей.

Осаждение металлических пленок проводят, как правило, путем осаждения металлосодержащих компонент на поверхности подложек в вакуумных камерах, входящих в состав вакуумных систем (рис. 2.4). Вакуум – разреженный газ,

находящийся при давлении ниже атмосферного. Понятие вакуума достаточно условно. Для количественной оценки степени вакуума Комитет стандартов Американского вакуумного общества предложил следующую классификацию:

Низкий вакуум	760...25 мм. рт. ст. ~ 105...3,3 10 ³ Па
Средний вакуум	25...10 ⁻³ мм. рт. ст. ~ 3,3 10 ³ ...1,33 10 ⁻¹ Па
Высокий вакуум	10 ⁻³ ...10 ⁻⁶ мм. рт. ст. ~ 1,33 10 ⁻¹ ...1,33 10 ⁻⁴ Па
Очень высокий вакуум	10 ⁻⁶ ...10 ⁻⁹ мм. рт. ст. ~ 1,33 10 ⁻⁴ ...1,33 10 ⁻⁷ Па
Сверхвысокий вакуум	ниже ...10 ⁻⁹ мм. рт. ст. ниже 1,33 10 ⁻⁷ Па

Термин высокий вакуум в более широком смысле используется для систем с давлением ниже 10⁻³ мм. рт. ст., а термин “форвакуум” используется для обозначения предварительного разряжения, достигаемого с помощью механических низковакуумных насосов.

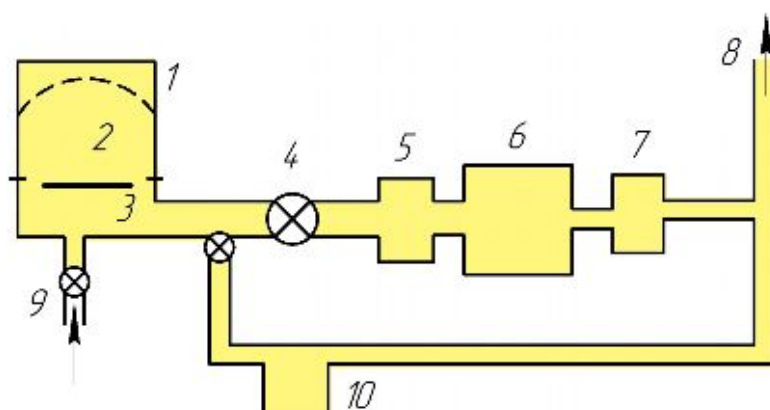


Рис. 2.4 Принципиальная схема вакуумной установки

В общем, виде основными частями вакуумной системы являются:

- рабочая камера (1), в которой располагаются подложкодержатель (2) и источник распыляемого материала (3);
- система предварительной откачки, состоящая из насоса предварительной откачки (10), форвакуумного насоса (7) и цеолитовых молекулярных ловушек; система сбросов газов (8);
- система высокого вакуума, состоящая из охлаждаемой жидким азотом ловушки (5) и паромасляного диффузионного, турбомолекулярного или криогенного насосов (6);
- система клапанов (4);
- измерительные датчики;
- система напуска распыляющего газа (9) для случая ионного распыления в атмосфере аргона.

Предварительные операции, выполняемые перед напылением:

1. Для устранения возможных источников захвата атмосферных газов удаляют любые пленочные образования на внутренних поверхностях камеры.
2. Затем в камере создается предварительный вакуум до 20 Па, а с использованием молекулярных ловушек до 0,5 Па.
3. Далее с помощью системы создания высокого вакуума давление понижается до рабочей величины, составляющей 60 мкПа.

Далее пластины, предварительно обработанные в растворах HF (для уменьшения содержания ионов натрия), вводятся в рабочую камеру через загрузочный шлюз, в котором поддерживается пониженное давление.

В системах с ионным распылением в рабочей камере перед распылением поддерживается давление аргона порядка 1 Па. При этом содержание воды и кислорода не превышает 10 мПа.

После металлизации пластины через шлюз выводятся из рабочей камеры.

Тонкие металлические пленки получают различными способами. К основным из них относятся испарение металлов, катодный и магнетронный метод и химическое осаждение из газовой фазы.

К общим проблемам напыления относятся [3,5]:

- достижение равномерного распределения рельефа на поверхности подложки;
- осаждение пленок на основе сплавов металлов заданного состава;
- устранение подтравливания металла под слоем резиста;
- снижение сопротивления контакта;
- загрязнение пленок инородными частицами.

Способы решения проблем напыления следующие:

- для обеспечения равномерности покрытия ступенек повышают температуру подложки до 300 С, а также оптимизируют ориентацию подложек относительно источника. Последнее очень важно при использовании точечных источников, применяемых при электронно-лучевом или индукционном нагреве расплава.
- пленки сплавов получают как осаждением из разных источников (при этом требуется высокая точность управления), так и из сплава. В последнем случае содержание пленки и сплава примерно идентичны.
- для уменьшения внедрения в растущую пленку загрязняющих частиц устраняют турбулентные потоки газов при откачке и напуске газов в камеру. В системах стремятся свести к минимуму осаждение пленок на вращающихся деталях конструкции.
- для уменьшения содержания паров масла в пленке, проникающими из механического и диффузионного насосов, используют криогенные ловушки и турбомолекулярные насосы.
- для устранения процессов подтравливания металлов используют анизотропное травление (плазменное или реактивное ионное). При использовании сплавов нетрадиционного состава применяют «взрывную» металлизацию.

Рассмотрим основные методы создания тонких пленок.

Термическое вакуумное напыление

Суть метода состоит в нагреве вещества в вакууме до температуры, при которой кинетическая энергия атомов и молекул испаряемого вещества становится достаточной для отрыва от поверхности и распространении в окружающем пространстве (см. рис.2.5). Термическое напыление протекает в три этапа[5]:

1. Испарение вещества с целью получения паро-атомарного потока;
2. Перенос пара в вакууме;
3. Конденсация пара на подложке с образованием пленочной структуры.

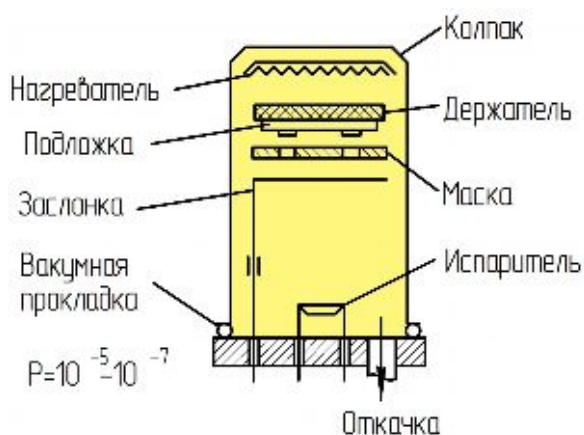


Рис. 2.5 Схема установки термического напыления

Нагревать испаряемые вещества можно прямым и косвенным путем. Прямой путь представляет собой резистивный нагрев материала, в этом случае испаряется спираль, по которой протекает ток. Косвенный путь подразумевает использование какого-либо побочного нагревателя, с температурой плавления, превышающей температуру испарения испаряемого вещества. Наиболее часто применяются проволочные, ленточные и тигельные испарители. Последние изготавливают из кварца, окиси алюминия, окиси тория и вакуумного графита.

При напылении с использованием источников резистивного нагрева металл закрепляется на нити, изготовленной из тугоплавкого материала (например, вольфрама), или помещается в специально приготовленную лодочку. Затем нить или лодочку нагревают, пропуская через них электрический ток. Металл при этом испаряется в окружающее пространство рабочей вакуумной камеры.

Для достижения более равномерного покрытия ступенчатого рельефа напыление осуществляют из нескольких спиралей одновременно.

Преимущества этого метода:

- простота конструкции нагревателя;
- низкая стоимость;
- отсутствие ионизирующего излучения.

Недостатки метода:

- загрязнение пленки материалом нагревателя;
- низкий срок службы спирали;
- малая величина загрузки.

При использовании электронно-лучевого испарения горячий катод (Cu) испускает пучок электронов (величина тока порядка 1А), ускоряемых напряжением 10 кВ.

Эти электроны направляются магнитным полем на участок мишени, где располагается испаряемый материал (Al). Траекторию движения электронов подбирают такой, чтобы примеси из катода не попадали на подложку. Сканирование луча по поверхности расплава предотвращает неоднородность в скорости осаждения.

Оптимальная скорость роста пленки составляет 0,5 мкм/мин. С помощью данного метода наносят пленки алюминия и его сплавов, а также Si, Pd, Au, Ti, Mo, Pt, W [3].

Преимущества этого метода:

- возможность использования больших по массе источников (не требуется перезагрузка при нанесении толстых пленок);
- возможность последовательного нанесения различных пленок из соседних источников, расположенных в одной камере;
- высокая скорость роста пленок;
- возможность напыления тугоплавких материалов.

Недостаток метода:

- наличие ионизирующего излучения, проникающего в приповерхностные слои кремниевых подложек (при производстве полупроводниковых ИС).

При напылении с использованием источников индукционного нагрева в тигель, обычно изготовленный из нитрида бора, помещают испаряемый материал. Тигель нагревается с помощью высокочастотного индуктора, охлаждаемого водой. С помощью данного способа возможно испарение алюминия и его сплавов, а также металлов, совместимых с материалом тигля.

Преимущества этого метода:

- отсутствие ионизирующего излучения;
- высокая скорость роста пленок.

Недостатки метода:

- наличие тигля, вызывающее дополнительные загрязнения;
- возможное разбрызгивание капель испаряемого материала из тигля.

В результате нагрева испаряемое вещество переходит из твердого в жидкое состояние. Некоторые металлы, такие как хром и вольфрам, могут испаряться из твердой фазы.

При дальнейшем повышении температуры, когда энергия, сообщаемая молекулам, станет достаточной для отрыва их от поверхности вещества, начнется испарение. Температура, при которой давление пара над поверхностью вещества составляет 1,33 Па, называется условной температурой испарения вещества. Скорость испарения определяется по формуле [5]:

$$V_{исп} = 0,058 p \cdot \sqrt{\frac{M}{T_{исп}}},$$

где $T_{исп}$ - температура испарения вещества; p - давление насыщенного пара; M - молярный вес испаряемого вещества.

В таблице 2.3 приведены значения $T_{кин.}$ и $T_{исп.}$ для различных материалов [3,5].

Таблица 2.3

Значение $T_{кип}$, $T_{исп}$, $V_{исп}$			
Материал	$T_{кип}$	$T_{исп}$	$V_{исп} * Г/см-с * 10^4$

Алюминий	2026	960	0.85
Вольфрам	5930	3309	1.45
Медь	2590	7273	1.18
Титан	3260	1546	0.95

Данные в таблице приведены для $p=7.33$ Па.

Напыленная тонкая пленка, как и любая неравновесная система, будет стремиться перейти к равновесию - релаксировать, "стареть" и тем быстрее, чем выше температура эксплуатации и меньше энергия активации. При этом будут сильно изменяться электрофизические параметры, в особенности сопротивление, что приведет к отказу пленочных резисторов и, следовательно, и ГИС (МСБ). Поэтому пленки подвергаются еще в процессе производства ускоренному старению - термостабилизации. Нагрев способствует рекристаллизации структуры с укрупнением зерен кристаллов, аннигиляции точечных дефектов субструктуры и окислению поверхности до пассивирующего окисного слоя. Движущей силой этих процессов является стремление системы к минимизации свободной энергии (избавлению от избыточной).

Достоинства методов термического напыления:

- простота оборудования;
- высокая скорость осаждения;
- возможность получения пленок с минимальными загрязнениями в условиях высокого вакуума в подколпачном объеме.

Недостатки методов термического напыления:

- трудность напыления тугоплавких металлов;
- трудность воспроизведения химического состава испаряемого вещества.

Катодное, ионно-плазменное и магнетронное распыление (рис. 2.6).

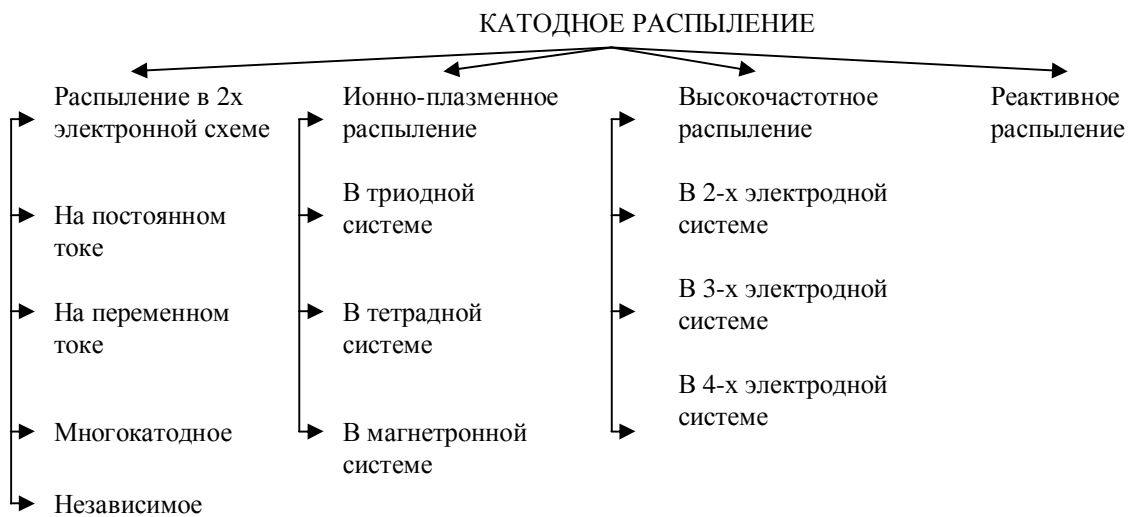


Рис. 2.6 Классификация методов катодного распыления [3]

Катодное распыление по двухэлектродной схеме (диодное распыление) основан на разрушении катода при бомбардировке его ионизированными атомами разряженного газа (см. рис. 2.7).

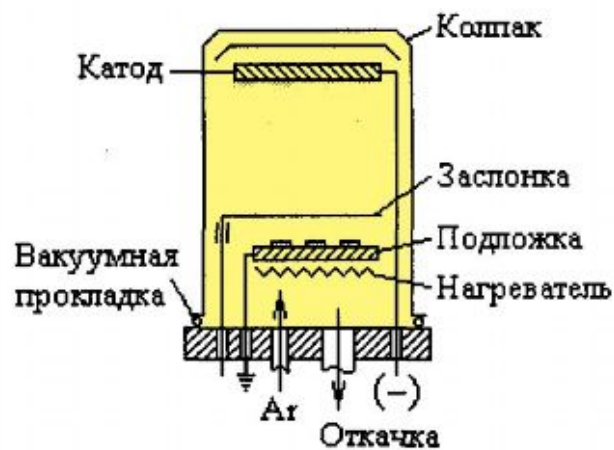


Рис. 2.7 Схема установки катодного распыления

Сначала из камеры откачивается воздух до давления 10^{-5} - 10^{-6} Па, затем закачивается аргон, в результате чего давление повышается до 10^{-1} - 10^{-2} Па. При подаче на катод отрицательного напряжения, в пространстве между анодом и катодом возникает атомарный тлеющий разряд, сопровождающийся образованием квазинейтральной электронно-ионной плазмы. Тлеющий разряд сопровождается электронной эмиссией из катода. Электроны в области разряда ускоряются, приобретая кинетическую энергию, достаточную для ионизации газа. В прикатодной области ускоряются положительно заряженные ионы газа.

Происходит бомбардировка катода, в результате которой, нейтральные атомы катода вылетают с его поверхности. Диффундируя, эти частицы достигают подложки. Количество распыляемого в единицу времени вещества катода можно определить по формуле [5]:

$$Q = \frac{K * [U - U_k] * I}{Pd},$$

где K-коэффициент пропорциональности; U-напряжение, приложенное между анодом и катодом; U_k -напряжение критического катодного падения, I - ионный ток, p -давление, d -ширина темного катодного пространства.

Реактивное катодное распыление основано на введении в подколпачное устройство реактивного газа, который взаимодействует с конденсирующим веществом на подложке, образуя химическое соединение (например, при введении кислорода образуются окиси напыляемого металла). Непрерывно подавая в камеру распыления один из активных газов, можно в зависимости от парциального давления получать либо твёрдые растворы распыляемого материала с активным элементом, либо химические соединения- окислы, нитриды, карбиды, сульфиды и т.д. Таким образом, можно формировать широкую гамму свойств осаждаемых плёнок - от проводящих и низкоомных резистивных до высокоомных резистивных и диэлектрических.

Преимущества метода катодного распыления:

- более равномерно распределяется толщина пленки;
- постоянный химический состав распыляемого материала;
- возможность распыления тугоплавких металлов;
- пленки обладают улучшенными адгезионными свойствами (из-за большей энергии частиц распыляемого вещества и возможности создания оксидного слоя);
- процесс не связан с высокой температурой.

Недостатки метода:

- низкая скорость роста пленки из-за низкого вакуума;
- наличие в пленке молекул остаточного газа;

- сложность контроля процесса напыления;
- подложка должна обладать высокой теплопроводностью.

В отличие от диодного распыления при **ионно-плазменном (триодном) распылении** достигается бомбардировкой мишени (а не катода) ионами плазмы газового разряда (см. рис. 2.8). Осаждение пленок методом ионно-плазменного распыления условно можно разделить на четыре основных этапа:

- формирование в тлеющем разряде потока частиц распыляющих мишень;
- физическое распыление поверхности катода-мишени ускоренными ионами и атомами;
- перенос распыленных атомов (молекул, кластеров) через рабочий газ к подложке;
- процессы зародышеобразования и роста пленок на подложках.

Сначала в камере создают предельно возможный вакуум, включают подогрев подложки и ток накала катода. После этого в подколпачную область напускают аргон до давления $10^1 - 10^2$ Па. Затем на анод подают напряжение в несколько сотен вольт, в результате чего между анодом и катодом возникает разряд (ток разряда 2-3А). После включения соленоида электроны начинают двигаться от катода к аноду по спирали. Когда на мишень подадут отрицательный потенциал порядка $-2 \div -3$ кВ, положительные ионы аргона с энергией, достаточной для распыления, начинают бомбардировку мишени. Процесс позволяет производить предварительную очистку мишени и подложки.

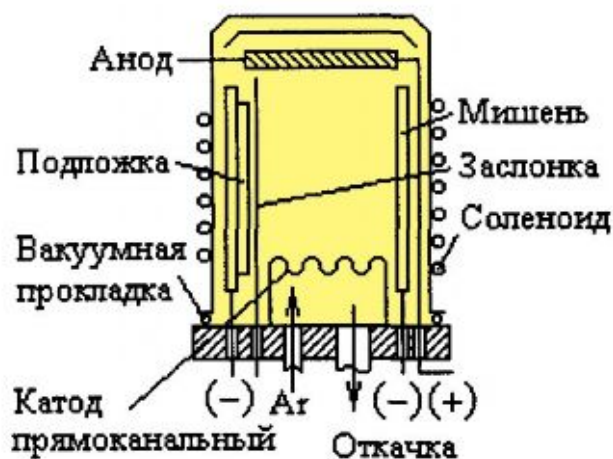


Рис. 2.8 Схема установки ионно-плазменного распыления

Преимущества метода ионно-плазменного распыления:

- возможность распыления металлов с различными свойствами;
- нанесение пленок из различных материалов мишени;
- большая, по сравнению с диодным методом скорость напыления;
- безинерционность процесса напыления;
- высокая адгезия напыляемой пленки (примерно в 20 раз выше, чем при термическом напылении);
- возможность распыления непроводящих материалов (ферритов, диэлектриков).

При высокочастотном ионно-плазменном распылении на металлическую пластину за мишенью подается высокочастотное напряжение с частотой 15 МГц 1-10 кВ. Это обусловлено тем, что для распыления диэлектрической мишени необходимо периодически с определённой частотой менять знак потенциала на мишени- при положительном потенциале поток электронов нейтрализует положительный заряд ионов, и ионы из плазмы вновь бомбардируют мишень. Происходит поочередная обработка мишени электронами и положительными ионами [3,5].

Необходимость увеличения скорости распыления материалов и, соответственно скорости осаждения покрытий, уменьшения рабочего давления газа в технологическом объеме, позволяющее уменьшить концентрацию загрязнений в растущей пленке определило разработку систем **магнетронного распыления**. Высокие скорости распыления обеспечиваются за счёт локализации плазмы у поверхности распыляемой мишени путём наложения скрещенных электрического и магнитного полей (рис.2.9).

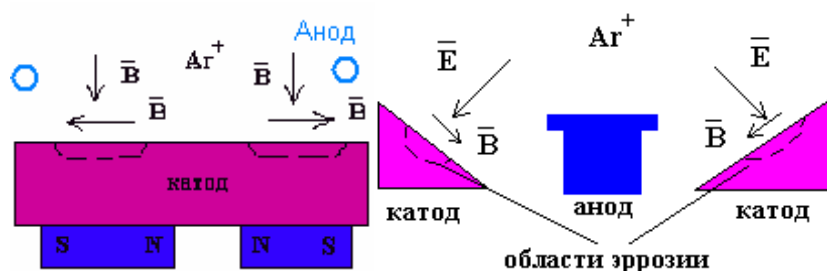


Рис. 2.9 Схема магнетронного распыления

В магнетронной системы с плоским катодом- мишенью и кольцевым анодом достигается высокие плотности разрядного тока, скорости осаждения и слабое воздействие вторичных электронов на подложку. Однако неравномерность электрического и магнитного полей приводят к распылению в основном только узкой кольцеобразной области мишени. В системе с коническим катодом обеспечивается более полное использование распыляемого катода и, кроме того, магнитная система дает возможность сконцентрировать магнитное поле ближе к распыляемому катоду, а за счет изменения положения анода устранено его экранирующее воздействие на подложку.

Преимущества метода магнетронного распыления:

- низкий импеданс изготавливаемых приборов;
- высокая скорость формирования пленок (1 мкм/мин);
- возможность одновременной обработки большого числа пластин (использование планарных держателей подложек);
- относительно малый поток проникающего излучения (за счет меньшей, чем при ионном распылении величины напряженности электрического поля).

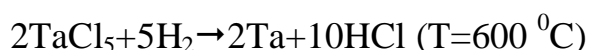
Недостатки метода:

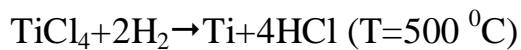
- внедрение аргона в пленку;
- наличие проникающего излучения.

Химическое осаждение металлов из парогазовой смеси.

Метод основан на химическом осаждении пленок из парогазовой смеси в реакторе пониженного давления. В технологии ИС этим способом в основном наносят пленки тугоплавких металлов, таких как W, Mo, Ta, Ti. Данные материалы используются как в качестве самостоятельных покрытий, так и как составную часть при формировании пленок силицидов, например, WSi₂.

Реакции, лежащие в основе процесса металлизации, следующие:





Нагрев происходит в реакторе с горячими или холодными стенками. В последнем случае проводят ВЧ нагрев подложек с подложкодержателем, а стенки реактора охлаждают. В реакторе с горячими стенками реакционная труба помещается в печь.

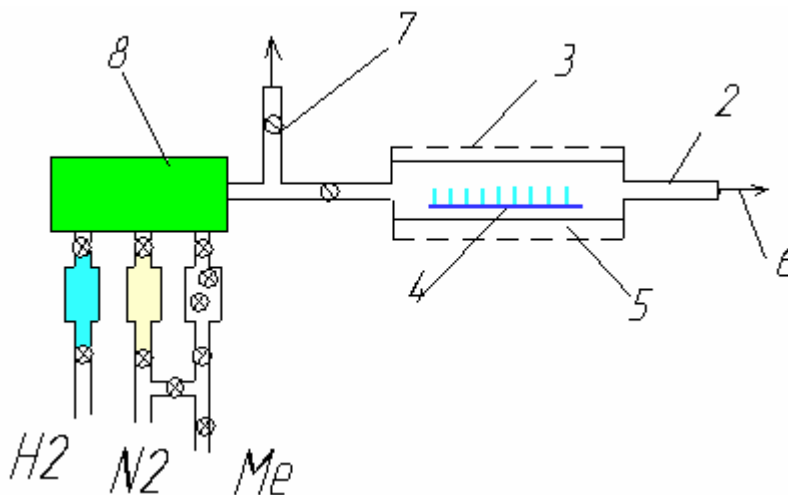


Рис. 2.10 Схема реактора для химического осаждения

Схема реактора приведена на рисунке (рис. 2.10):

1. - Газораспределительная система
2. - Система сбросов газов
3. - Печь
4. - Подложки
5. - Реактор
6. - Выход к насосу
7. - Вентили
8. - Измерители расхода газа.

Преимущества метода химического осаждения металлов:

- хорошее качество пленки, воспроизводящей рельеф поверхности подложки;
- возможность нанесения пленок на относительно большое количество подложек одновременно;
- простота оборудования.

Недостаток метода – невозможность получения качественных пленок алюминия.

2.2.2 Методы формирования тонкопленочных структур.

Определенную конфигурацию пленочные элементы ГИС (МСБ) (резисторы, конденсаторы, внутрисхемные соединения и контактные площадки) приобретают в результате использования масочного метода, метода фотолитографии, комбинированного метода и др. Выбор того или иного метода зависит от способа нанесения пленки (см. 2.2.1), требований по точности и плотности размещения элементов, воспроизводимости, производительности и др. факторов [1,5].

Метод съемной маски основан на экранировании заданной части подложки от потока частиц, напыляемого термовакуумным способом вещества с помощью трафарета – маски. Подобная съемная маска с окнами с достаточной точностью (до ± 5 мкм) повторяет топологию тонкопленочной микросхемы. При напылении маска закрепляется в держателе, который обеспечивает плотный прижим к подложке. Точность изготовления окон в маске обуславливается необходимой точностью размеров напыленных элементов. В промышленных условиях наибольшее распространение получили биметаллические маски толщиной 80-100 мкм из бериллиевой бронзы, покрытой никелем. Маска выдерживает около ста циклов напыления, после чего заменяется [1,5]. Точность совмещения тонкопленочных слоев при масочном методе находится в пределах 0,1 мм. Эта погрешность обусловлена в основном различием тепловых деформаций подложки ИС и маски [5].

Метод фотолитографии (ФЛ) основан на совокупности фотохимических процессов, основные из которых – это формирование на поверхности подложки слоя фоторезиста; передача изображения топологии с фотошаблона на этот слой;

формирование конфигурации элементов с помощью маски из фоторезиста (рис. 2.11).

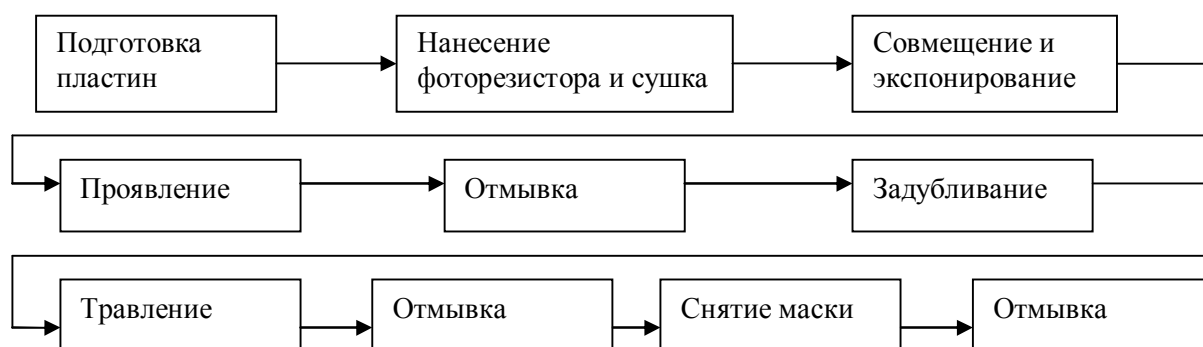


Рис. 2.11 Схема метода фотолитографии

Целью ФЛ процесса является перенос деталей рисунка фотошаблона (ФШ) на поверхность подложки ИС, покрытой слоем фоторезиста (ФР).

Под ФР понимают резист, чувствительный к излучению в видимой или ультрафиолетовой области. Различают соответственно позитивные и негативные ФР. Фоторезисты, у которых растворимость экспонированного облучением участка уменьшается, называются негативными, а ФР растворимость которых после облучения возрастает – позитивными. В позитивных ФР облученные участки могут быть удалены с помощью соответствующих растворов проявителей. Незасвеченные участки при этом сохраняются, повторяя рисунок ФШ. Основные параметры и марки выпускаемых ФР приведены в [5].

Наиболее распространенным способом нанесения ФР на подложки является центрифугирование [6]. В образовании слоя ФР участвуют центробежные и вязкостные силы, взаимодействие которых определяет толщину слоя. Один из основных дефектов при получении рисунка тонкопленочных элементов – поры в слое ФР. Количество пор – проколов в слое ФР – зависит от толщины ФР, определяемой частотой вращения центрифуги, и его вязкости.

Фотошаблон представляет собой плоскопараллельную пластину из стекла, на которую нанесен рисунок в виде прозрачных и непрозрачных для излучения участков [8], причем данные участки образуют топологию тонкопленочной ИС.

Фотолитография может быть контактной (шаблон находится в плотном контакте с фоторезистом) и бесконтактной (ФЛ на микрозоре и проекционная ФЛ).

Основные этапы ФЛ процесса приведены на рис. 2.11. Подробно техпроцесс ФЛ рассматривается в [5,8].

На каждом из этапов ФЛ действуют факторы, искажающие исходный рисунок ФШ. В частности при экспонировании имеют место явления дифракции, преломления и отражения излучения. В процессе экспонирования необходимо обеспечить условия, чтобы поглощение слоем фоторезиста ультрафиолетовой энергии было наибольшим. Поэтому при выборе источника облучения необходимо исходить из спектральных характеристик фоторезиста, приближая к ним спектральные характеристики источников облучения. Для процесса экспонирования основными параметрами являются энергия и время. При прочих равных условиях доза поглощенной энергии определяет глубину и объемы происшедших в фоторезисте фотохимических реакций, точность размеров и качество линий фоторезистивной маски.

На этапе проявления и задубливания искажения рисунка обусловлены набуханием фотослоя и усадкой ФР. После проявления фоторезиста можно оценить, насколько правильно выбраны значения параметров операции сушки и экспонирования. Критерием качества служат достигнутые размеры элементов фоторезиста и прочность прилегания к поверхности осажденных пленок.

При травлении появляется боковое подтравливание под маску [5]. Если минимальные по размерам элементы рисунка соизмеримы с суммарной погрешностью, то воспроизводимость переноса рисунка недостаточна.

При контактной ФЛ возможно получение элементов ИС с размерами порядка не менее 1 мкм с допуском на размеры $\pm 0,5$ мкм. При этом зазор при контактировании ФШ и подложки носят случайный характер, что приводит к ряду оптических эффектов [4]. Кроме того, к искажению изображения приводят механическая и температурная деформация пластин при контактировании. При контактном методе экспонирования также часто происходит повреждение пленки ФР и поверхности ФШ. Эти дефекты уменьшаются при использовании рельефной конструкции ФШ (рис. 2.12), исключая непосредственный контакт ФШ с ФР [5]. Получение полного плотного контакта между ФШ и

подложкой представляет собой практически неразрешимую задачу из-за изогнутости пластин, неидеальности плоскости контактируемых поверхностей, наличия между ними посторонних частиц, из-за неравномерности толщин различных пленок и фотослоя и др. Частичные воздушные зазоры приводят к усилению дифракционных эффектов и обуславливают дополнительное расширение размеров получаемого изображения.

Дальнейшее совершенствование метода контактной ФЛ связано с уменьшением длины волны экспонирующего излучения вплоть до мягкого рентгеновского излучения с $\lambda=1$ нм (см. гл. 3).

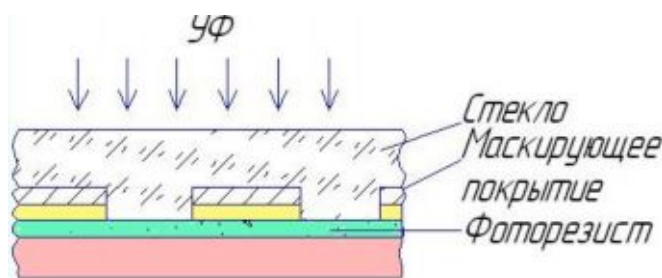


Рис. 2.12 Схема рельефной конструкции ФШ

Экспонирование с микрозазором отличается от контактного экспонирования только тем, что после совмещения между подложкой и шаблоном имеется зазор 10-25 мкм, при котором и осуществляют облучение фотослоя. Этот наиболее простой процесс бесконтактного экспонирования можно проводить на тех же установках, что и контактное экспонирование. Наличие зазора при экспонировании увеличивает влияние дифракции света на передачу рисунка, что приводит к искажению формы и размеров элементов и обусловлено проникновением света в область геометрической тени. Достижимые минимальные размеры элемента при этом увеличиваются и составляют 2-4 мкм. Зазор при экспонировании значительно уменьшает повреждения шаблона и увеличивает срок его службы.

Более совершенным методом является проекционная ФЛ, при которой рисунок ФШ проектируется на подложку с ФР с помощью специальной оптической системы. Шаблон расположен на расстоянии от подложки и его износ полностью исключен.

Проекционные системы по принципу формирования изображения могут быть разделены на системы, одновременно формирующие изображение на всем

поле подложки; сканирующие системы (последовательное экспонирование). Первый класс систем обеспечивает высококачественное изображение только при наличии плоской подложки с неплоскостностью не более единиц микрона по всей поверхности. В сканирующих системах получение изображения осуществляется путем последовательного формирования изображения, построение его по частям некоторым ограниченным полем, что обеспечивает более высокую разрешающую способность [3,5]. Сканирование может проводиться как по одной координате, т.е. с разверткой в одном направлении полосой, равной поперечному размеру поля изображения, так и по двум координатам.

В технологическом цикле изготовления тонкопленочных ИС процесс ФЛ составляет 50 % всей трудоемкости производства. Наиболее существенными параметрами, несущими информацию о качестве процесса ФЛ (всего порядка 54 параметра), являются: внешний вид фоторезистивной маски после проявления, уход размера от заданного и число дефектных модулей. Анализ качества указанных параметров представлен в [3].

Применительно к формированию тонкопленочных структур ИС существуют две разновидности метода ФЛ: одинарная и двойная фотолитография. Одинарная ФЛ применяется в сочетании с методом съемной маски. В частности для создания резистора, резистивную пленку напыляют в виде сплошного покрытия, контактные площадки и внутрисхемные соединения напыляют через съемные маски, а конфигурацию резистора формируют методом ФЛ (см. рис.2.13) [5].

При использовании двойной ФЛ с помощью первой фотолитографии формируются конфигурация проводников и контактных площадок, с помощью второй фотолитографии – резисторы (см. рис. 2.14).

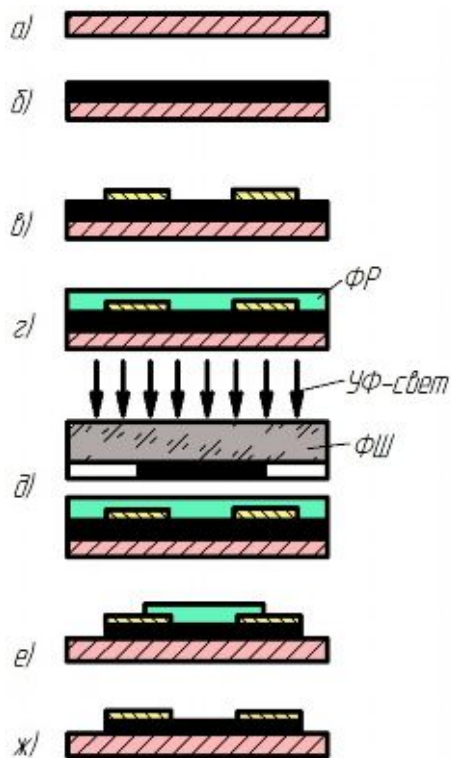


Рис. 2.13 Схема метода одинарного селективного химического травления (одинарная фотолитография):
 а – подложка; б — нанесение резистивной пленки; в — нанесение контактов через свободную маску; г — нанесение фоторезиста; д – экспонирование; е — селективное травление после проявления фоторезиста; ж - удаление фоторезиста и получение готового элемента

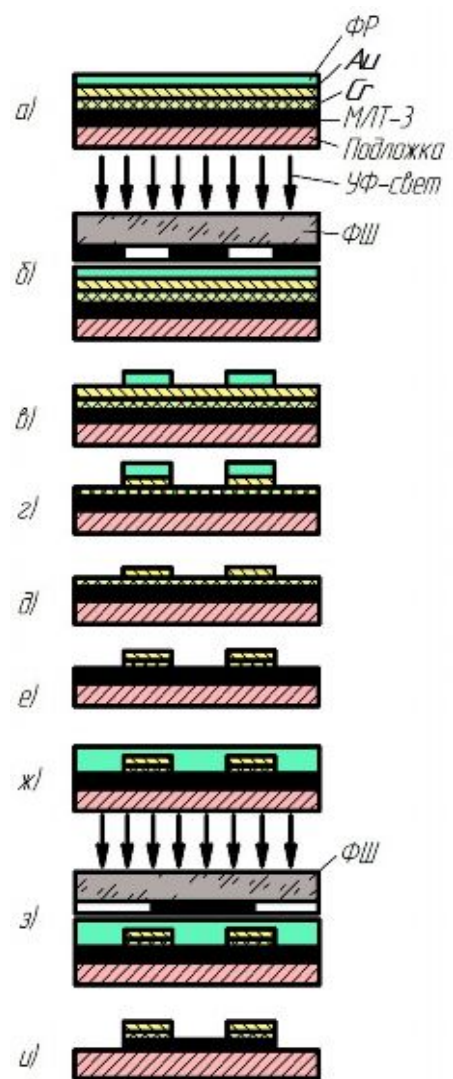


Рис. 2.14 Схема метода двойного селективного химического травления (двойная фотолитография):
 а — заготовка со слоем фоторезиста (позитивного); б – экспонирование; в - проявление фоторезиста; г — селективное травление золота; д — снятие фоторезиста; е — селективное травление хрома; ж — второе нанесение фоторезиста; з - второе экспонирование; и - селективное травление и удаление фоторезиста (получение готового элемента)

2.2.3 Пассивные элементы тонкопленочных интегральных схем.

Пленочные резисторы являются наиболее распространенными элементами гибридных ИС. Пленочные резисторы в структурном отношении представляют собой узкую полосу резистивной пленки, снабженную пленочными контактными площадками с низким сопротивлением. Они характеризуются такими основными параметрами, как номинальное значение сопротивления R , допуск на сопротивление $\pm \delta R$, мощность рассеяния P , температурный коэффициент сопротивления ТКР, коэффициент старения $K_{СТР}$, интервал рабочих температур ΔT , надежность и другие. Требуемые значения параметров пленочных резисторов определяются схемотехническим решением и условиями эксплуатации ИС. Кроме того, параметры пленочных резисторов зависят от материала резистивной пленки, способа нанесения пленки на подложку, способа получения необходимой конфигурации и других технологических факторов.

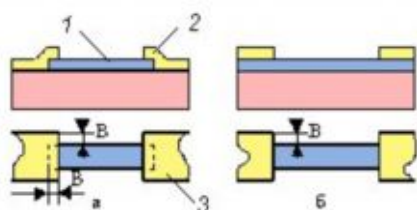


Рис. 2.15 Конструкция тонкопленочного резистора прямоугольной формы: 1 – резистивная пленка, 2 – пленочный проводник, 3 – области контактов

В зависимости от применяемой схемы требования к параметрам пленочных резисторов могут быть различными. Общим требованием является минимальная площадь, занимаемая резистором. В гибридных ИС используют тонкопленочные резисторы различной конструкции с простой прямоугольной и сложной формой. Наиболее распространенной является конструкция резисторов прямоугольной формы, как наиболее простая в конструктивном и технологическом решении (рис. 2.15).

Возможны три технологических варианта формирования резисторов:

- А. Фотолитографический: напыление сплошной резистивной пленки, напыление сплошной проводящей пленки, фотолитография по проводящей пленке, фотолитография по резистивной пленке .
- В. Трафаретный: напыление резистивных элементов через трафарет, напыление проводящих элементов через трафарет (рис. 2.15).
- С. Комбинированный: напыление сплошной резистивной пленки, напыление проводящих элементов через трафарет, фотолитография по резистивной пленке (рис 2.15)

Трафаретный вариант, хотя и является более производительным и дешевым, заметно уступает фотолитографическому по разрешающей способности (a_{\min}) и точности (Δ_{Π}), что следует из сравнительной таблицы 2.4.

Таблица 2.4

Сравнение фотолитографического и трафаретного вариантов

Параметр	Фотолитографический вариант	Трафаретный вариант
a_{\min} , мм	0,1	0,3
$\pm \Delta_{\Pi}$, мм	$\pm 0,005$	$\pm 0,02$
В, мм	0,1	0,2
$(l/a)_{\max}$	Не ограничено	10

Уширение проводящего вывода на величину В с каждой стороны призвано не допустить изменение сопротивления резистора из-за погрешности совмещения резистивного и проводящего рисунков.

Значение сопротивления пленочного резистора определяют с помощью выражения

$$R = \frac{\rho_0 l}{\epsilon_d + 2R_d} .$$

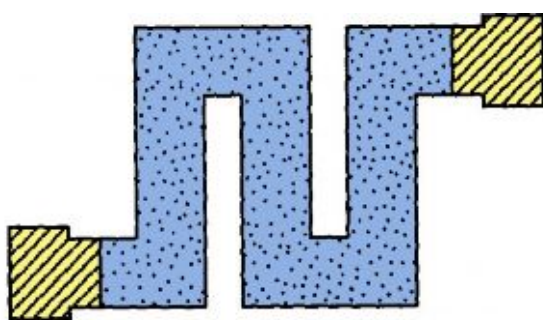
Для высокоомных резисторов, когда R областей контактов значительно меньше R резистивной пленки.

$$R = \frac{\rho_0 l}{\epsilon_d} ,$$

где ρ_0 - удельное сопротивление резистивного материала; l, v, d - длина, ширина и толщина резистивной пленки; R_k - переходное сопротивление областей контактов резистивной и проводящей пленок.

Для каждого материала отношение $\rho_0/d = \rho_s$ - величина постоянная, определяемая как удельное поверхностное сопротивление квадратной резистивной пленки, не зависящее от размеров квадрата, и оцениваемое как Ом/□. Соответственно $K_\phi = l/v$ - коэффициент формы резистора. Конструкция резисторов высокоомных сложной конфигурации с $K_\phi > 10$ и низкоомных с $K_\phi < 0,3$ показаны на рис 2.16-2.17.

Исходными данными для расчета тонкопленочных резисторов являются схематические данные, технологические данные и ограничения, эксплуатационные данные.



$K_\phi > 10$

Рис. 2.16 Резистор типа «Меандр»



$K_\phi < 0.3$

Рис. 2.17 Низкоомные резистор

Расчет пленочных резисторов, заключающийся в выборе материалов и определении геометрических размеров и формы пленочных элементов, обеспечивающих получение элементов с воспроизводимыми параметрами, представлен в [4,7,10].

Для изготовления пленочных резисторов используют разные материалы: металлы, сплавы, соединения, керметы, удовлетворяющие требованиям по металлургической совместимости, адгезии, технологичности и стабильности [7]. Характерной особенностью пленок является зависимость удельного сопротивления материала пленки от ее толщины, причем такая зависимость для

всех материалов связана с условиями нанесения пленок. С точки зрения технологичности нанесения пленки, воспроизводимости и стабильности ее свойств, каждый материал характеризуется определенной толщиной, для которой удельное сопротивление материала является оптимальным (таблица 2.5) [12].

В технологически обоснованных случаях применяют специальные конструкции, допускающие ступенчатую и плавную подгонку их сопротивлений.

Необходимость подгонки возникает тогда, когда типовой техпроцесс не обеспечивает заданных допусков на сопротивление, а повышение точности процесса требует значительных дополнительных затрат, превышающих затраты на подгонку [5].

Подгонка резисторов может быть групповой (одновременно по всей подложке) и индивидуальной. Групповую подгонку можно осуществить, окисляя поверхность резистивной пленки или сравнивая поверхностный слой. Метод обеспечивает точность сопротивлений в лучшем случае единицы процентов.

Таблице 2.5.

Типичные параметры пленочных резисторов.

Тип резистора	R ₀ , Ом/□	R _{max} , Ом	R _{min} , Ом	δ, %		ТКС- 10 ⁻⁴ /С°	ΔR(t), % при 70°С на 1000ч
				б/подг	с/подг		
Тонкоплёночный	10 - 30000	10 ⁶	10	± 5	± 0.05	0.25	0.005
Толстоплёночный	5 - 10 ⁶	10 ⁸	0.5	± 15	± 0.2	2	0.05

При индивидуальной подгонке изменяют свойства и толщину пленки (термотокковой обработкой, обработкой лучом лазера, анодным и химическим окислением) или контур самого резистора (с помощью вращающегося бура, электроискровым испарением и т.п.).

Наиболее технологическими и эффективными являются методы, связанные с изменением коэффициента формы.

Конструкции пленочных резисторов со ступенчатой и плавной подгонкой показаны на рис. 2.18 [5].

Ступенчатая подгонка обеспечивает точность до единиц процентов, плавная – до сотен долей процента.

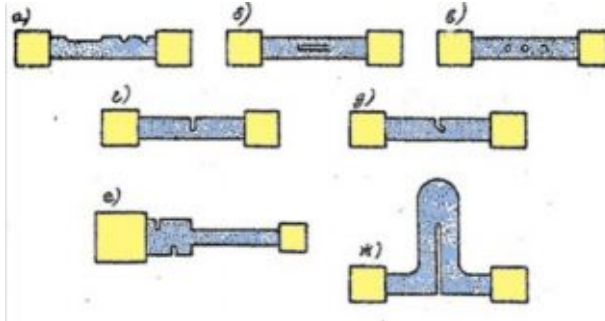


Рис. 2.18. Конфигурация подгоняемых пленочных резисторов: а, б, в – путем удаления части резистивной пленки; г, д, е, ж – врезанием.

При этом обеспечивается более широкий диапазон изменения величины подгоняемого резистора, однако, только в сторону его возрастания при одновременном снижении допустимой мощности, рассеиваемой резистором.

Для дискретной подгонки получили распространения специальные конструкции резисторов (см. рис. 2.19), позволяющие осуществлять подгонку путем перерезания или замыкания контактных перемычек

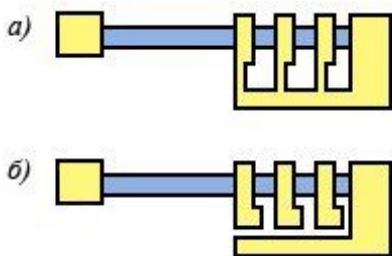


Рис. 2.19 Конфигурация дискретно подгоняемых пленочных резисторов: а – перерезанием перемычек; б – замыканием контактных зазоров.

Тонкопленочный конденсатор представляет собой трехслойную структуру – проводящий слой 2, выполняющий роль нижней обкладки, слой диэлектрика 3 и проводящий слой 4, выполняющий роль верхней обкладки (см. рис. 2.20 а) [4].

При активной площади S конденсатора $1 \leq S \leq 5 \text{ мм}^2$ используется пере сечение проводников (рис. 2.20 б), при $S < 1 \text{ мм}^2$ - гребенчатые структуры (рис. 2.20 в).

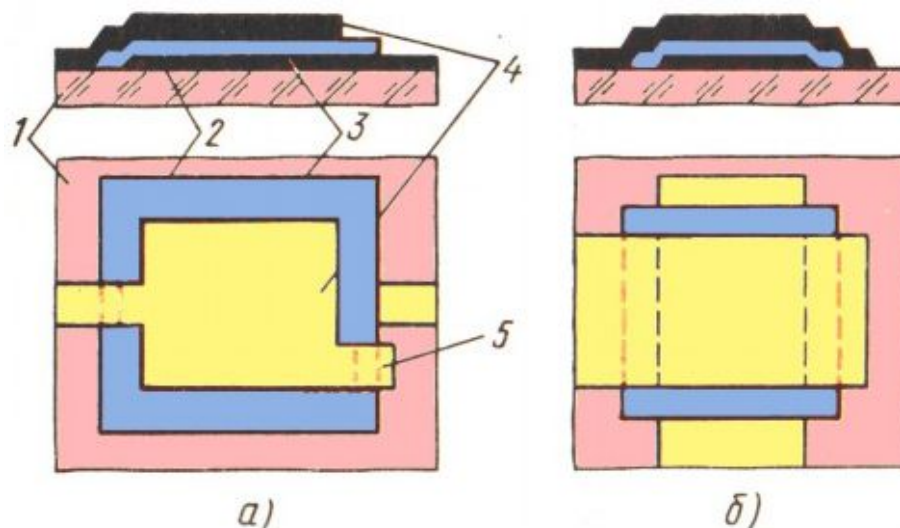


Рис. 2.20 Конструкции тонкопленочных конденсаторов

Конструкция, в которой контур верхней обкладки вписывается в контур нижней обкладки, предназначена для реализации конденсаторов повышенной емкости (сотни-тысячи пикофард). Ее особенностью является то, что несовмещение контуров обкладок не сказывается на воспроизведении емкости (для устранения погрешности из-за площади вывода верхней обкладки предусмотрены компенсаторы, а распространение диэлектрика за контуры обеих обкладок гарантирует надежную изоляцию обкладок при их предельном несовмещении. Для конденсаторов небольшой емкости (десятки пикофард) целесообразна конструкция в виде пересекающихся проводников одинаковой ширины, разделенным слоем диэлектрика. Емкость конденсатора данной конструкции нечувствительна к смещению обкладок из-за неточности их совмещения. Для реализации высокочастотных конденсаторов применяют гребенчатую конструкцию, в которой обкладки имеют форму гребенчатых проводников, а диэлектрик является составным типа «подложка-воздух» или «подложка-диэлектрическое покрытие».

Емкость пленочного конденсатора рассчитывается по формуле

$$C = \frac{EE_0S}{d},$$

где E_0 - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрического слоя, S - площадь перекрытия обкладок, d - толщина диэлектрика. Произведение

$\epsilon_0 E/d$ - постоянная величина для всех одновременно формируемых на подложке конденсаторов, называемая удельной емкостью C . Соответственно величина емкости принимает вид $C = \epsilon_0 S$ и определяется выбором материала диэлектрической пленки C_0 и площадью перекрытия S .

Задача расчета конденсаторов сводится к рациональному выбору материалов и методов формирования трехслойной структуры. Расчет и проектирование тонкопленочных конденсаторов представлен в [4,7]. Параметры конденсаторов при различных материалах обкладок и диэлектрика приведены в таблице 2.6 [12].

Таблица 2.6

Параметры конденсаторов при различных материалах обкладок и диэлектрика

Материал обкладки	Материал диэлектрика	C_0 , пФ/мм ²	C_{max} , нФ	δ , %	ТКЕ, % / °С	Q (10МГц)	Епр В/мкм
Al	SiO ₂	60-100	1500	± 15	0.2	200	50-100
Al+Ni	Al ₂ O ₃	1500	4-10 ⁴	± 15	0.03	30	<500
Al	GeO ₂	100-200	3000	± 15	0.15	200	10-50
Ta+Ni,	Ta ₂ O ₅	4000	10 ⁵	± 15	0.02	30	<500
Толстоплёночные		30	10 ⁴	± 20	0.05-0.15		

Применение фотолитографии для формирования топологии пленочных конденсаторов недопустимо из-за загрязнения диэлектрика травителями и соответственно ухудшения его электрических свойств. Поэтому методом формирования диэлектрика и обкладок является метод напыления через маски-трафареты [5].

Если при использовании типовых техпроцессов не может быть достигнута заданная точность, предусматривают индивидуальную подгонку емкости конденсаторов. Осуществление плавной подгонки сопряжено с трудностями обусловленными снижением электрической прочности диэлектрика или возможностью закорачивания обкладок вдоль границы удаляемого участка. При удалении участков верхней обкладки возможно разрушение диэлектрического слоя. Удовлетворительные результаты получают при использовании

конструкции конденсаторов, предполагающих дискретную подгонку (рис. 2.21). Такие конденсаторы состоят из основной и вспомогательных секций, перерезаемых (а) или замыкаемых (б) в процессе подгонки [8].

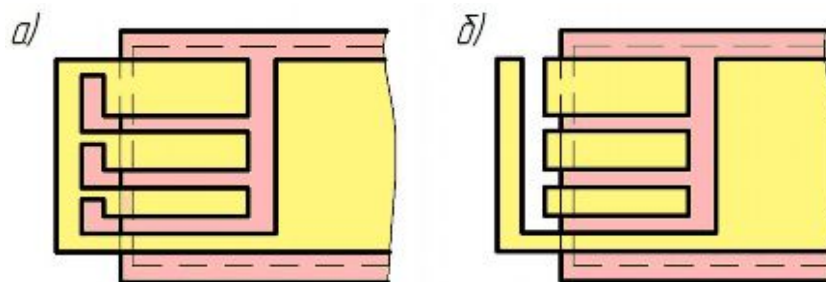


Рис. 2.21 Конденсаторы с дискретной подгонкой

В целом задача получения тонкопленочных конденсаторов высокой точности и надежности является весьма сложной. При этом наличие тонкопленочных конденсаторов усложняет техпроцесс и существенно увеличивает площадь подложки. Ограничения присущие пленочным конденсаторам (максимальная емкость, стабильность, надежность, потери, площадь) приводят в ряде случаев к необходимости применять в ГИС (МСБ) дискретные навесные конденсаторы [5].

На завершающем этапе изготовления пассивной части тонкопленочной ГИС (МСБ), для защиты пленочных элементов от воздействия внешней среды, на подложку с пассивной частью наносится защитная пленка с окнами в местах замещения контактных площадок. В качестве материала защитных пленок используется моноокись кремния при методах формообразования и фоторезисторы при фотолитографическом методе.

В тонкопленочных схемах применяют в некоторых случаях пленочные индуктивности в виде однослойной спирали (рис. 2.22). В качестве материала спирали обычно используют золото, так как оно обладает хорошей проводимостью. Такие спирали имеют очень малую индуктивность (единицы мкГ/см^2) [12].

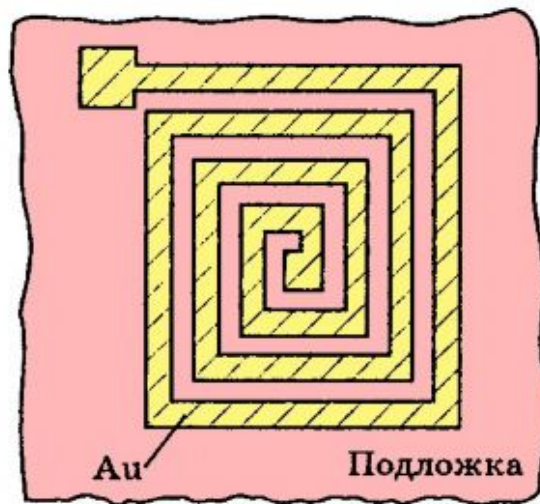


Рис. 2.22 Пленочная индуктивность

При изготовлении больших индуктивностей трудно одновременно удовлетворить двум противоречивым требованиям – уменьшить габариты и получить высокую добротность. Наиболее целесообразная форма индуктивности – квадратная. Подобная индуктивность, например на 10 , содержит 46 витков шириной 0,05 мм каждый при расстоянии между витками 0,1 мм; размер катушки 15×15 мм. Поскольку изготовление тонкопленочных индуктивностей связано с большими трудностями, в тонкопленочных схемах применяют главным образом дискретные микрокатушки индуктивности с сердечником их порошкового железа или из специальных ферритов.

Для соединения элементов и компонентов в ГИС (МСБ) согласно электрической схемы используют плёночные проводники и контактные площадки. Общие требования, предъявляемые к плёночным проводникам и контактным площадкам заключаются в высокой электропроводности, теплостойкости, химической инертностью, предполагающая устойчивость к коррозии. Специальные требования вытекают из назначения контактных площадок воспринимающих механические нагрузки от подсоединяемых проводников и высокотемпературные воздействия при пайке и сварке. Для соединения выводов компонентов пайкой, кроме того, необходимо, чтобы поверхность контакта легко смачивалась припоем. С целью обеспечения технологичности для плёночных проводников и контактных площадок, как

правило, применяют одинаковые материалы с низким сопротивлением и высокой адгезией, наносимые в едином вакуумном цикле. Оптимальным вариантом при этом является многослойная структура. Первый слой формируют из материала с высокой адгезией, второй - из материала с высокой электропроводностью. Сверху наносят защитный слой из металла, обладающего к тому же и возможностью припайки. Наиболее часто употребляемые сочетания металлов, используемые для проводников и контактных площадок приведены в таблице 2.7 [3,5,7,12].

Таблица 2.7

Металлы, используемые для проводников и контактных площадок

Адгезионный слой	Проводящий слой	Защитный слой	Метод контактирования
Нихром 100...300 А	Золото 5000 А		Сварка, пайка
Нихром 100...300 А	Медь 8000 А	Никель 300...500 А	Сварка
Нихром 100...300 А	Медь 6000 А	Серебро 1000 А	Сварка, пайка
Ванадий 200...300 А	Медь 4000 А	Горячее лужение 25 мкм	Пайка
Ванадий 200...300 А	Алюминий 3000 А	Никель 500 А	Сварка

Расчёт плёночных проводников и контактных площадок проводят с учётом требований предъявляемых к характеристикам ГИС (МСБ). Эти требования проявляются в ограничении значений следующих параметров проводников: падения напряжения на проводнике, сопротивление проводника и контактного перехода, плотности тока через проводник, собственной ёмкости и индуктивности проводника и др. [2,7].

Процесс проектирования топологической структуры ГИС (МСБ) включает последовательное выполнение работ по расчёту плёночных элементов и их оптимальной компоновке вместе с компонентами на плате заданных размеров. При этом процесс проектирования выполняется в четыре этапа [4,7]:

- определение минимальных размеров платы, выбор компонентов и типа размера корпуса;
- разработка коммутационной схемы соединений элементов;
- расчет геометрических размеров плёночных элементов;
- разработка окончательного варианта топологии.

При включении данных этапов соблюдают следующие общие рекомендации:

- минимизация площади, занимаемой элементами, компонентами;
- минимизация числа пересечений межэлементных соединений;
- равномерное расположение элементов и компонентов по плате;
- минимизация числа используемых материалов.

2.2.4 Параметры качества тонкопленочных элементов, проблемы его обеспечения.

Основной целью любого производства и в том числе производства ИС является обеспечение качества выпускаемой продукции. Качеством ИС называют совокупность свойств, обуславливающих его способность удовлетворять определенные потребности в соответствии с назначением [5].

Согласно методике оценки уровня качества изделий электронной техники имеется восемь групп свойств и соответственно восемь групповых показателей качества: по назначению, надежности, стандартизации и унификации, технологичности, экономичности, эргономичности и эстетичности, а также патентно-правовые. Из этой совокупности показателей можно выделить обобщенные, которые определяют в большей мере значение уровня качества. Это относится к показателям качества по назначению, технологичности и надежности [5].

Среди показателей качества по технологичности значительная роль отводится проценту выхода годных ИС. Для обнаружения дефектов, а также для проверки соответствия изготовленной ИС требованиям ТУ существует система контроля качества. При производстве ИС применяют разнообразные методы

контроля, при этом предпочтение отдается неразрушающим методам, которые не изменяя качества, характеристик и параметров ИС, позволяют по косвенным, вторичным признакам обнаруживать дефекты и проводить анализ качества [16]. Неразрушающий контроль позволяет исследовать ИС в процессе разработки, производства и эксплуатации, а также вводиться в технологический процесс.

Различают производственный контроль и контроль готовых ИС. Производственный контроль качества является частью типового технологического процесса и носит как пассивный, так и активный, диагностирующий характер. При пассивном контроле регистрируется только факт существования дефекта в ИС. При диагностирующем контроле получается информация о природе дефектов, что позволяет корректировать техпроцесс.

Наиболее характерны для элементов тонкопленочной (пассивной) части ГИС (МСБ) следующие отказы [16]:

- разрывы металлизированных соединительных проводников, вызванные царапинами;

- разрывы в местах пересечений металлизированных проводников с окисным слоем, возникающие под действием локального перегрева металла;

- короткое замыкание металлизированных соединительных проводников, вследствие дефектов травления при изготовлении соединений и контактных площадок;

- разрывы соединений между контактной зоной на поверхности подложки и проволочным выводом.

Отказы тонкопленочных резисторов главным образом определяются технологическими дефектами:

- механическими повреждениями резистивного слоя;

- загрязнением резистивных пленок;

- окисление резистивного слоя из-за некачественного защитного покрытия.

Спецификой контроля качества тонкопленочных ГИС (МСБ) является изготовление подложки с пассивными элементами в непрерывном вакуумном цикле. При этом в задачу контроля входит оценка качества полученных

пленочных структур и параметров процесса напыления пленок. Целью контроля параметров процесса напыления является обеспечение идентичности условий напыления для каждого вакуумного цикла, а также воспроизводимости параметров пленки, непосредственное определение которых в процессе напыления невозможно.

Основными контролируруемыми параметрами при напылении пленок являются толщина и скорость нанесения пленок. По физическим принципам методы контроля указанных параметров можно подразделить на [5]:

- методы, основанные на измерении параметров осаждаемой на подложку пленки в течение определенного промежутка времени;
- методы, основанные на измерении параметров потока испаряемого материала;
- методы, основанные на измерении реакции контрольной подложки на испаряемые частицы.

Методами первого типа непосредственно измеряют толщину пленки в процессе напыления, методами второго и третьего типов – скорость нанесения пленок.

При напылении металлических пленок целесообразно вместо толщины измерять сопротивление. Датчиком сопротивления служит контрольный образец (“свидетель”) подключенный к измерительной схеме [5]. По достижению некоторого заранее рассчитанного значения $R_{CB} = R_3$ процесс напыления прекращается (см. рис. 2.23).

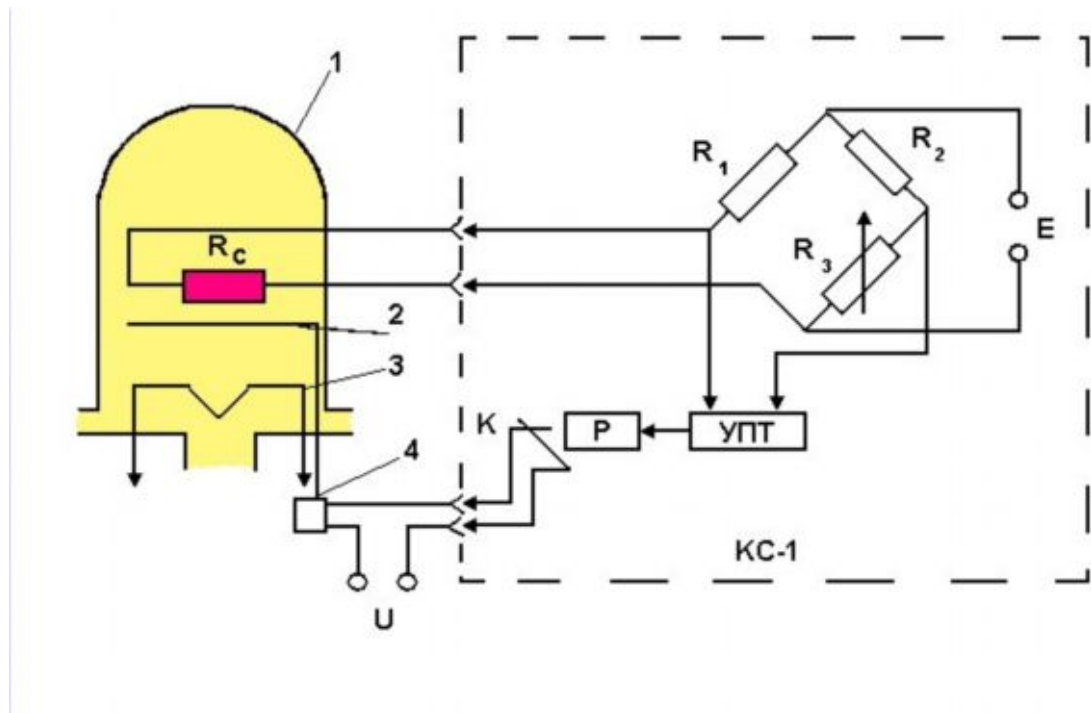


Рис. 2.23 Функциональная схема системы контроля с помощью прибора КС-1

Для контроля толщины пленок широко используется частотный метод. В качестве преобразователя используется кварцевый элемент, включенный в контур генератора частоты. Частота генерируемых сигналов кварцевого преобразователя зависит от массы кварцевого элемента в процессе напыления на его поверхность пленки. С увеличением массы элемента m_0 его резонансная частота падает. Для линейного участка зависимости справедливо соотношение

$$|\Delta F| = F_0 \frac{\Delta m}{m_0},$$

где F_0 – резонансная частота кварцевого элемента до напыления; Δm и ΔF – изменение массы и частоты вследствие напыления пленки.

Первой операцией межоперационного и финишного контроля является контроль внешнего вида пассивной части ГИС (МСБ). Визуальный контроль с помощью микроскопа проводится с целью отбраковки ГИС (МСБ) имеющих явно выраженные дефекты пленок – искажение рисунка, смещение слоёв относительно друг друга, вздутие и отслаивание, царапины.

Также при межоперационном и финишном контроле тонкопленочных ГИС (МСБ) проводится контроль электрических параметров элементов – сопротивлений резисторов, проводников, изоляции, а также емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов. При измерении электрических параметров используются специальные зондовые приспособления, обеспечивающие надежное подключение пленочного элемента к измерительным приборам, как правило, цифровым автоматическим.

2.3. Конструктивно - технологические особенности толстоплёночных интегральных схем.

2.3.1 Технология получения толстопленочных элементов.

Толстоплёночные интегральные схемы представляют собой схемы, проводники, контактные площадки, резисторы и конденсаторы создаются на основе толстых плёнок толщиной в несколько десятков мкм.

В основе толстоплёночной технологии лежит использование дешёвых и высокопроизводительных процессов, требующих небольших единовременных затрат на подготовку производства, благодаря чему она оказывается экономически целесообразной и в условиях мелкосерийного производства. Высокая надёжность толстоплёночных элементов обусловлена прочным (свыше 50 кгс/см²) сцеплением с керамической подложкой, которое достигается процессом вжигания пасты в поверхностный слой керамики.

Для формирования конфигурации плёночных элементов используются трафаретный способ печати паст специального состава.

Нанесение паст можно производить двумя способами: бесконтактным и контактным [3,5,7,12]

При бесконтактном способе подложку (см. рис. 2.24), на которую нужно нанести пасту, устанавливают под сетчатым трафаретом с некоторым зазором; пасту подают поверх трафарета и движением ракеля через отверстия в трафарете переносят на подложку в виде столбиков, копирующих отверстия в трафарете.

Столбики, растекаясь, соединяются, образуя рисунок, как на трафарете.

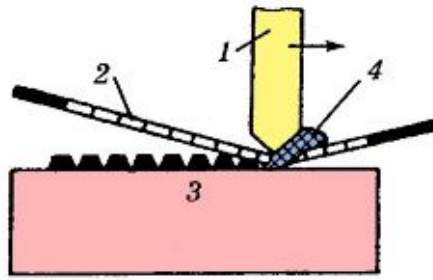


Рис. 2.24 Схема трафаретной печати

1 - ракель; 2 - трафарет; 3 - подложка; 4 - паста.

Сетчатые трафареты изготавливают из капрона, нейлона или нержавеющей стали. Номер сетки (число нитей на сантиметр), толщина сетки и размер открытой области являются факторами, влияющими на количество наносимой краски и качество получаемого изображения. В целом, чем больше номер сетки, тем меньше толщина наносимого слоя и выше четкость получаемого отпечатка.

Ракель изготавливается из резины или полиуретана. Последний материал сохраняет острый профиль ракеля при длительной эксплуатации и поэтому часто применяется в автоматической сеткографии.

Качество трафаретной печати зависит от скорости перемещения и давления ракеля, зазора между сетчатым трафаретом и подложкой, натяжения трафарета и свойств пасты, угла сетки [3].

Угол сетки характеризует направление нитей основы и угла в раме сетки по отношению к направлению движения ракеля. Обычно используются сетки с тремя углами: 90° , 45° и $22,5^{\circ}$.

Другим важным фактором, влияющим на качество печати, является натяжение сетки. Обычно оно обеспечивается с помощью механического устройства. Недостаточное усилие натяжения сетки может вызвать задержку отставания (отслаивания) сетки. При недостаточном натяжении клейкая паста вызывает залипание сетки на поверхности основы, что ведет к смазыванию оттиска и неравномерному нанесению краски. Рама для сетки должна иметь такую конструкцию, чтобы выдерживать натяжение сетки и не допускать её ослабления.

Необходимо строго соблюдать параллельность платы, трафарета и направления движения ракеля.

Для устранения неравномерности толщины резисторов рекомендуется составлять топологию так, чтобы все резисторы по длине располагались в одном направлении по движению ракеля. По этой же причине не рекомендуется проектировать длинные и узкие или короткие и широкие резисторы, т.к. при использовании одной и той же пасты короткие резисторы имеют большую толщину плёнки, а, следовательно, меньшее удельное сопротивление, чем длинные, из-за разных прогибов открытых участков сетчатого трафарета.

При контактном способе трафаретной печати плату устанавливают под трафаретом без зазора. Отделение платы от трафарета осуществляется вертикальным перемещением без скольжения во избежание размазывания отпечатка пасты. При контактном способе пасту можно наносить пульверизацией с помощью распылителя. Точность отпечатка при контактном способе выше, чем при бесконтактном.

В целом толстоплёночная технология состоит из ряда последовательных идентичных циклов, структурная схема которых приведена на рис 2.25.

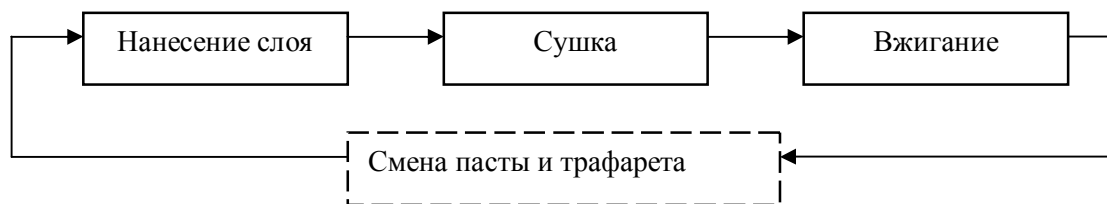


Рис. 2.25 Структурная схема цикла толстоплёночной технологии

При формировании каждого слоя (резистивного, проводящего, диэлектрического и т.п.) используют соответствующие пасты, которые через сетчатый трафарет наносят на подложку, подвергают сушке и вжиганию. По завершении формирования всех слоёв все резисторы и конденсаторы проходят подгонку (обычно лазерную) до заданной точности.

В зависимости от назначения пасты подразделяются на проводниковые, резистивные, диэлектрические. Для контактных площадок применяют также дополнительное покрытие припойными пастами, не подлежащими вжиганию и упрощающими процесс последующей пайки выводов компонентов.

Паста, подлежащая вжиганию, содержит три основных компонента [3,5,7]. Функциональная составляющая представляет собой мелкодисперсионные частицы металлов, окислов металлов, солей которые определяют свойство проводников, резисторов и диэлектриков. Конструкционная составляющая (фритта) - это частицы легкоплавкого стекла, температура плавления которой лежит ниже температуры вжигания. В процессе вжигания стекло смачивает частицы функциональной фазы, образуя суспензию, а после охлаждения образует механически прочное покрытие с квазиравномерным распределением частиц (см. рис. 2.26). Технологическая составляющая выполняет роль связки, которая смачивает частицы порошков функциональной и конструкционной составляющих и придаёт им определённую вязкость и поверхностное натяжение, необходимые для трафаретной печати.

Для проводящих функциональных составляющих используются порошки серебра, палладия и других металлов с высокой электропроводностью. Для резистивных - смесь порошков проводящих частиц и частиц окислов металлов в различных пропорциях, что позволяет варьировать удельное поверхностное сопротивление в широких пределах. Диэлектрические слои конденсаторов содержат порошки сегнетоэлектриков, которые, обладая большим значением относительной диэлектрической проницаемости ϵ , обеспечивают большие значения удельной ёмкости C_0 . Изолирующие слои, наоборот, создаются на основе порошков стёкол с малыми ϵ и C_0 .

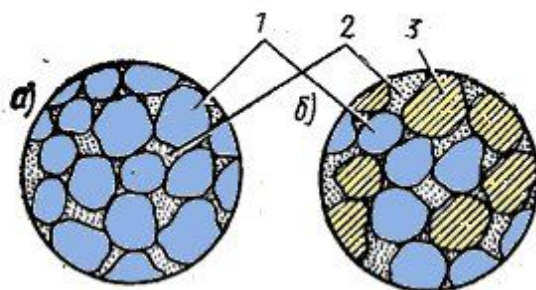


Рис. 2.26 Структура толсто пленочных элементов: 1 – частицы металла, 2 – Конструкционная связка; 3 – частицы окисла металла.

Марки и свойства различных паст приведены в [1,5,7,9].

Особую группу паст представляют собой лудящие пасты. Они состоят из

частиц припоя, смоченных раствором флюса (например, канифоль в спирте). После нанесения через сетчатый трафарет на толстоплёночные монтажные площадки и сушки, покрытие подвергается оплавлению (230°C).

Пасты после нанесения подвергают термообработке - сушке и вжиганию. Сушка необходима для удаления из пасты летучих компонентов (растворителя). Сушку проводят при температуре $80\div 150$ градусов Цельсия в течение $10\div 15$ минут в установках с инфракрасным нагревом. Инфракрасное излучение проникает вглубь слоя пасты на всю его глубину, обеспечивая равномерную сушку без образования корочки на поверхности.

В зависимости от масштабов производства вжигание осуществляется в камерных печах периодического действия (мелкосерийное производство), либо в туннельных печах непрерывного действия (крупносерийное и массовое производство).

На рис. 2.27 приведён температурный цикл вжигания пасты. На первой стадии скорость подъёма температуры относительно невысока, происходит разложение органической связки и её удаление с помощью интенсивной вытяжной вентиляции. На второй стадии скорость роста температуры повышают, происходит плавление низкотемпературного стекла и образование суспензии твёрдых функциональных частиц в расплавленном стекле. Собственно вжигание происходит на третьей стадии при постоянной температуре. Происходит сплавление частиц основных материалов между собой с образованием проводящих мостиков и спекание их со стеклом и керамической пастой при $500\div 1000^{\circ}\text{C}$.

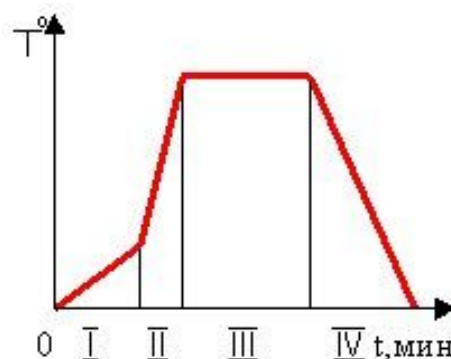


Рис. 2.27 Температурный цикл вжигания пасты

При этом имеет место как химическое (взаимодействие окислов стекла и керамики), так и физическое (заполнение стеклом открытых поверхностных пор керамики), сцепление покрытия с подложкой. После выдержки (~10 мин.) изделия медленно охлаждают (четвёртая стадия) во избежании внутренних напряжений. Общая продолжительность цикла порядка одного часа.

Пасты для создания проводящих слоев вжигают при 750÷800 градусах Цельсия, пасты диэлектрика конденсаторов и изоляционный слой - при 700÷750 градусах Цельсия, верхние обкладки конденсаторов - при 700÷720 градусах Цельсия, диэлектрик защитного слоя- при 620÷650 градусах Цельсия. Для исключения появления сквозных пор в диэлектрике конденсаторов его наносят в два слоя, причём каждый слой сушат и вжигают отдельно. Температура вжигания для пасты резисторов составляет около 640⁰С. Таким образом, в зависимости от назначения плёнки и её исходного состава вышеуказанные режимы термообработки различны (см. рис. 2.28).

Разница в температурах, необходимых для вжигания и спекания проводников, диэлектриков и резисторов, обуславливает определённую последовательность изготовления платы: каждая последующая операция должна протекать при более низкой температуре по сравнению с предыдущей, поэтому резисторы наносятся в последнюю очередь.

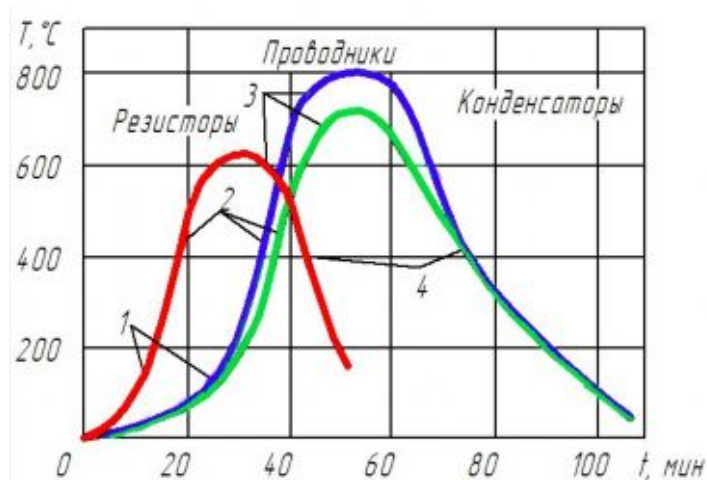


Рис. 2.28 Режимы термообработки проводящих, резистивных и диэлектрических паст; 1 – сушка; 2 – вжигание органической связки; 3 – спекание; 4 – охлаждение.

Таким образом, процесс формирования элементов состоит из ряда

последовательных циклов «нанесение слоя - сушка - вжигание» (см. рис. 2.28) [5]. Выбор конкретных марок паст определяется двумя факторами: максимальной температурой вжигания и чувствительностью данного слоя к повторным нагревам.

Некоторые дефекты трафаретной печати и их влияние на характеристики толстопленочных элементов приведены в [3,14].

2.3.2. Пассивные элементы толстопленочных интегральных схем.

Расчет толстопленочных резисторов осуществляют аналогично расчету тонкопленочных резисторов прямоугольной формы и приведен в [5,7]. Разница в расчете заключается только в отсутствие данных по точности воспроизведения V_{p_s} , Δl и Δb . При определении размеров учитываются конструктивно-технологические ограничения и мощность рассеяния.

Исходными данными для расчета являются: номинал R_i ; кОм; мощность рассеивания P ; относительная погрешность изготовления до подгонки $\nu_R\%$, заданная точность после подгонки $a_R\%$.

Ввиду сложности обеспечения приемлемой точности сопротивления без подгонки, расчет толстопленочных резисторов осуществляется с заведомо меньшим значением R_i .

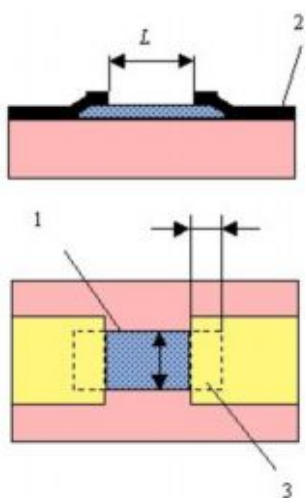


Рис. 2.29 Конструкция толстопленочного резистора прямоугольной формы: 1- резистивная плёнка; 2- плёночный проводник; 3- область контактов.

При этом все резисторы должны иметь прямоугольную форму (рис. 2.29) с $0,2 \leq K_{\phi} \leq 6$, а минимальные размеры (длина и ширина) составляют 0,8 мм. Ширина контактной площадки 2 должна превышать ширину резистивного слоя 1 не менее чем на 0,3 мм с каждой стороны. Перекрытие 3 резистивного 1 и контактного слоя 2 должно быть не менее 0,3 мм.

При конструировании толсто пленочных конденсаторов выбор материалов обкладок и диэлектрика ввиду их толщины не связан с проблемами, возникающими при конструировании тонкопленочных конденсаторов из-за особенности толсто пленочной технологии, предполагающей последовательное вжигание пленок таким образом, чтобы температура вжигания на каждом этапе была ниже, чем на предыдущем.

Проектирование толсто пленочных конденсаторов производится с учетом подгонки емкости до заданного номинала т.к. погрешность емкости при изготовлении составляет $v_c = \pm 20\%$ и более. Поэтому расчет на точность не выполняется. Толсто пленочные конденсаторы изготавливают только прямоугольной формы (рис. 2.30), где 1 – подложка, 2 – проводящий слой, 3 – слой диэлектрика, 4 – проводящий слой.

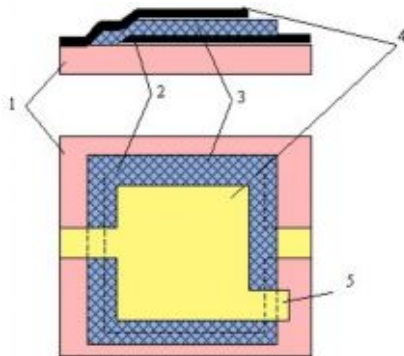


Рис. 2.30 Конструкция толсто пленочного конденсатора с обкладками прямоугольной формы

Исходными данными для расчета являются: емкость C_i , рабочее напряжение U , относительная погрешность емкости при изготовлении $v_c\%$, заданная точность $a_c\%$. Порядок расчета приведен в [4,7].

Основные параметры толсто пленочных резисторов и конденсаторов приведены в табл. 2.5 – 2.6.

Подгонка конденсаторов состоит в удалении части верхней обкладки, в результате чего емкость уменьшается. Следовательно, для того чтобы емкости конденсаторов имели завышенные значения, необходима корректировка состава паст или толщины слоев. При подгонке необходимо тщательно подбирать режимы обработки для исключения короткого замыкания обкладок.

В толсто пленочных ИС для получения коммутационных проводников применяют проводящие стеклоэмали с наполнителем из серебра, аналогичные стеклоэмали для верхних обкладок конденсаторов. Для повышения электропроводности и облегчения условий подпайки и сварки на контакты верхнего уровня наносят методом сеткографической печати лудящую пасту, которую затем оплавливают методом горячего лужения.

2.3.3 Технологические погрешности и контроль качества толсто пленочных сопротивлений

Технологические факторы, действующие на операциях получения толстых пленок при создании ГИС (МСБ), могут случайным образом отклоняться от заданных значений в пределах допуска. Например, при получении толсто пленочного резистора случайные погрешности имеют такие технологические факторы, как скорость движения ракеля V и его давление на трафарет и подложку P , вязкость пасты, микронеоднородности пасты, размеры отверстий в трафарете, температура сушки, обжига, вжигания и другие факторы. Случайные погрешности вызывают случайные отклонения

параметров элементов, которые можно описать нормальным распределением вероятностей. Кроме того, существуют и неслучайные погрешности технологических факторов, которые, воздействуя в совокупности со случайными, могут создать, в общем, сложные распределения погрешностей параметров пленочных элементов и в частности. сопротивлений резисторов. К таким погрешностям технологических факторов можно отнести, например, погрешность толщины слоя, возникшую вследствие возможного перекоса поверхности подложки относительно поверхности трафарета, температурный градиент печи для сушки, влияние на толщину пленки площади поверхности элемента и коэффициента формы. Остановимся на последнем факторе подробнее.

Основной исходной величиной для определения номинальных значений сопротивлений толстопленочных резисторов является удельное поверхностное сопротивление квадрата резистивной пленки ρ_s :

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s m,$$

где m – число «квадратов резистивной пленки, равное отношению длины резистора l к его ширине b . При расчете обычно используют одно значение ρ_s , указанное изготовителем пасты и уточненное применительно к имеющемуся оборудованию. Однако величина ρ_s имеет различное значение для различных форматов резисторов. Это связано с изменением толщины резистивной пленки при изменении размера резистора, а также с тем, что форма резистора отличается от прямоугольной.

Рассмотрим влияние ширины, длины и формы ТПР на ρ_s . На рис. 2.31 показаны поперечные и продольные разрезы резисторов различной ширины и длины. Из рис. 2.31 а, б и в видно, что при приведении поперечного разреза одинаковых по толщине резисторов разной ширины

к прямоугольной форме толщина их (d) становится различной. Это значит, что, и значения ρ_s также будут разными для этих резисторов.

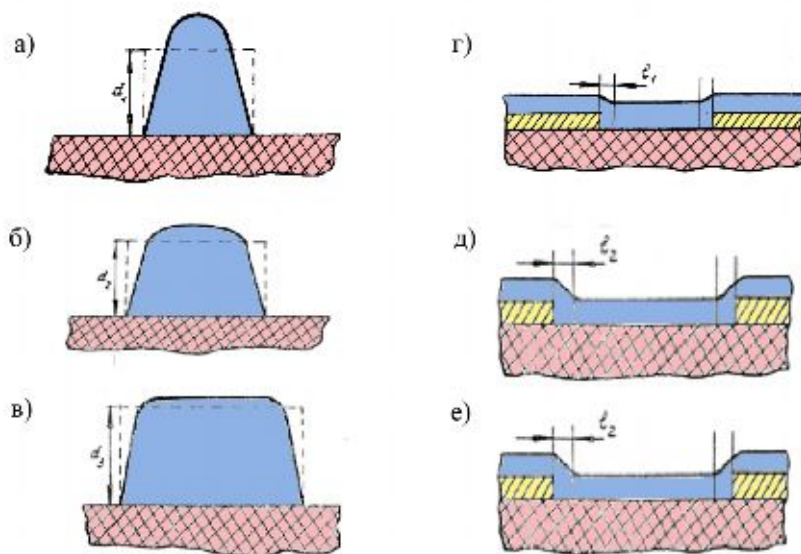


Рис. 2.31 Поперечные (а, б, в) и продольные (г, д, е) разрезы толстопленочных резисторов различной ширины и длины

Кроме того на рис. 2.31 г, д, е видно, что резисторы имеют утолщения возле контактных площадок. Значение r_s для приконтактных областей будет меньше, чем для остальной части резистора. А т.к. доля вклада приконтактной области в общее сопротивление для резисторов различной длины будет разной, то и изменение сопротивления с изменением длины будет отличаться от описываемого формулой. Особенно заметно будет влияние приконтактных областей в коротких резисторах.

2.4 Пленочные микрополосковые структуры микросборок СВЧ диапазона

Особенностью ГИС (МСБ) СВЧ диапазона является то, что в состав топологического рисунка плат включаются элементы, специфичные для данных частот, например направленные ответвители (мосты Ланге), фильтры, различные согласующие элементы; резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д. Такие платы получили название микрополосковые

платы (МПП) [6]. Подобная плата обычно представляет собой диэлектрическую подложку, на поверхности которой сформированы сосредоточенные элементы — резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д. и распределенные элементы схемы — микро-полосковые линии (МПЛ). МПП имеют топологический рисунок на лицевой поверхности и экранную заземляющую металлизацию на обратной поверхности плат. Надежность микрополосковых плат определяется необходимостью обеспечения требований по адгезии проводниковых элементов к диэлектрической подложке при воздействии термоциклических нагрузок и механического воздействия, температурной стабильностью элементов (например, резисторов), электрической прочностью диэлектрических пленок в пленочных конденсаторах, местах пересечений проводников и межуровневой изоляцией, а также явлениями электромиграции и образования нитевидных кристаллов [6].

Традиционным для классификации СВЧ ГИС (МСБ) является признак разделения по конструкции микрополосковых линий и их структуре. По технологии изготовления они делятся на толстопленочные и тонкопленочные ГИС.

Толстопленочные ГИС (МСБ) имеют толщину проводящих дорожек порядка 30 мкм, шириной не менее 150 мкм, получаемых, как известно, нанесением металлизированной пасты, содержащей измельченные проводящие или резистивные и связующие стеклообразные составляющие. Однако из-за слабой химической связи толстые пленки плохо адгезируют к хорошо обработанной (до 13-14-го класса чистоты) подложке и при воздействии высокой температуры (300°С) и влажности происходит отслаивание. Это явление не наблюдается при нанесении толстых пленок на подложку 8—10-го класса обработки, однако при этом возрастают потери и ухудшается точность нанесения рисунка схемы, что существенно для применения МСБ в СВЧ-диапазоне. Реальная точность выполнения размеров элементов по толстопленочной технологии составляет ± 20 мкм. Отмеченные

недостатки ограничивают использование толсто пленочных ГИС (МСБ) в основном нижней частью СВЧ-диапазона (1 - 4 ГГц) [14].

Тонкопленочные ГИС обеспечивают более высокую плотность монтажа и, следовательно, позволяют получить микросхемы с лучшими электрическими, массогабаритными и другими характеристиками. Тонкопленочные ГИС (МСБ) с толщиной проводников 3 - 12 мкм, наиболее широко используемые в СВЧ-устройствах, обычно имеют сложную слоистую структуру проводников, пример такой структуры показан на рис. 2.32 [6]:

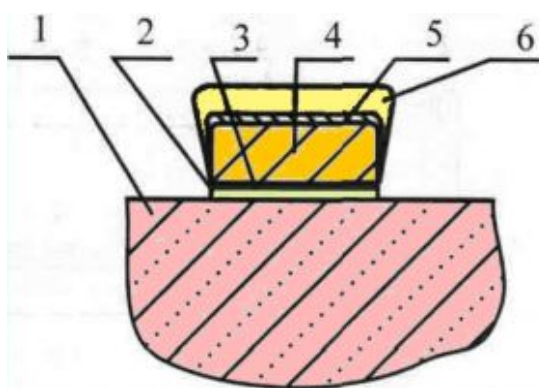


Рис. 2.32 Слоистая структура проводников: 1 - диэлектрическая подложка; 2 — адгезионный подслой (хром); 3 — слой напыленной меди; 4 — гальванически наращенный слой меди; 5 — барьерный слой гальванического никеля; 6 - антикоррозионный слой золота.

Тонкопленочная технология позволяет получать более тонкие линии с шириной менее 20 мкм и точностью ± 3 мкм. Тонкопленочные конструкции ГИС и МСБ изготавливают на подложках 11-14-го классов обработки из таких материалов, как ситалл (СТ 32-1, СТ 8-1), поликор (ВК-100-1), сапфир, кварц и т.д., что обеспечивает меньшие потери по сравнению с толсто пленочными. В связи с этим они используются на частотах вплоть до 30 ГГц и выше [6].

Требования к послойной микрополосковой структуре для ГИС СВЧ накладывают на технологию их изготовления ряд ограничений. На рис. 2.33 представлена структурная схема технологии формирования ММП для бесфлюсовой сборки платы ГИС СВЧ[6].

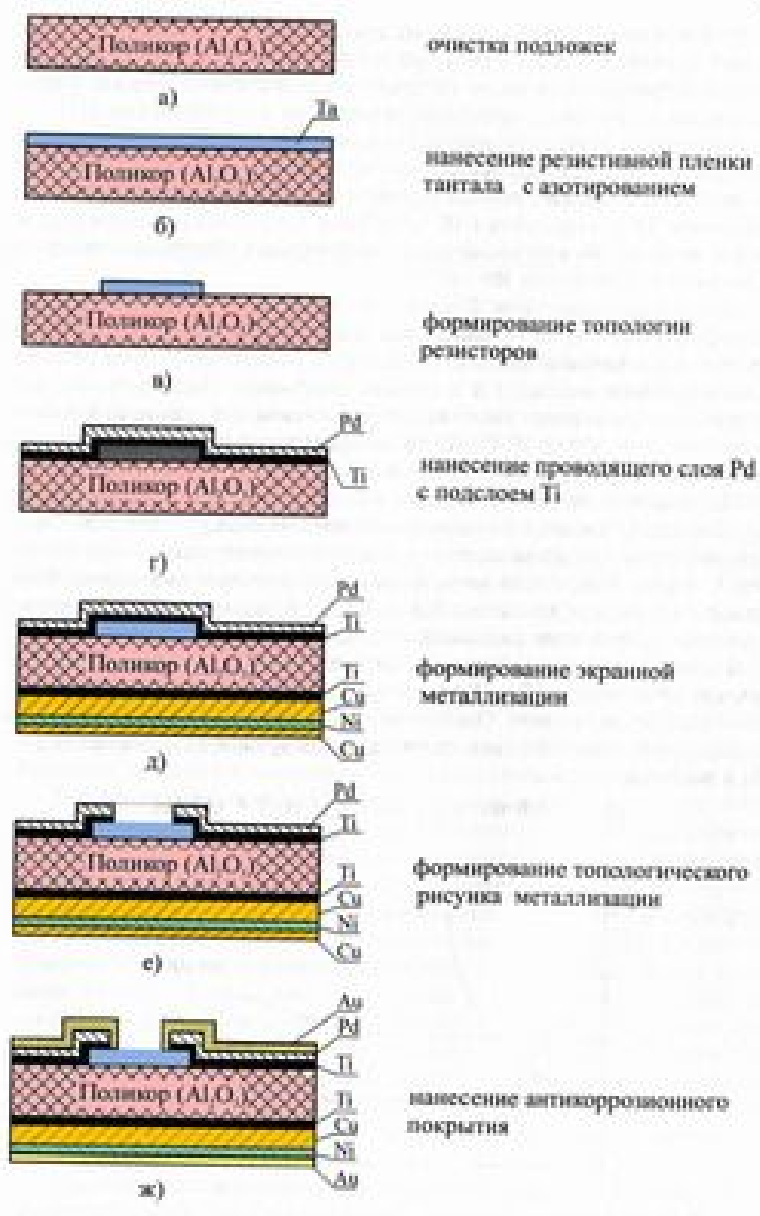


Рис. 2.33 Схема изготовления МПП для бесфлюсовой сборки платы ГИС СВЧ

На первой стадии изготовления МПП, подложки из алюмооксидной керамики поступают на операцию очистки (рис.2.33а). Качество очистки определяет величину адгезии напыленных слоев к подложке, наличие контактных переходных сопротивлений на тонкопленочных резисторах. На этой стадии удаляются с подложек органические загрязнения, остатки полировочных смол т.п. Наилучшее качество очистки обеспечивается сочетанием механической и химической обработок подложек. Далее наносят резистивные пленки методом магнетронного напыления (рис.2.33). Пленки образуются на основе азотированного тантала. Топологию

резисторов формируют стандартным методом фотолитографии (рис.2.33 в) с травлением пленок в разбавленном растворе азотной и плавиковой кислот. Подложки с тонкопленочными резисторами тщательно очищают и в едином вакуумном цикле методом магнетронного напыления наносят пленку титана с толщиной и методом термического испарения и в вакууме пленку палладия толщиной $0,2 \pm 0,05$ мкм (рис.2.33 г).

На экранной стороне подложки методом магнетронного напыления наносят пленку титана и методом термического испарения в вакууме - пленку меди толщиной 3...4 мкм. После чего магнетронным напылением формирует барьерный слой никеля толщиной 0,3...0,4 мкм, и термическим испарением в вакууме - слой меди толщиной 0,1...0,2 мкм (рис.2.33 л).

Фотолитографический процесс получения топологии схемы (рис.2.33 с) по тонкопленочной системе Ti - Pd основан на стандартных технологических операциях.

Гальваническое наращивание слоя золота толщиной 3 мкм (рис.2.33 ж) проводят в фосфатном электролите горячего золочения одновременно на лицевую и экранную стороны подложек. Согласно опыту крупносерийного производства ГИС СВЧ, золотые покрытия, полученные в фосфатном электролите, характеризуются высокой чистотой и малой напряженностью, что способствует высокой прочности сварных термокомпрессионных соединений. После проведения операции наращивания золота подложки проходят тщательную очистку кипячением.

Удаление технологических проводников выполняют методом фотолитографии, последовательным травлением многослойной структуры Au - Pd - Ti.

После проведения фотолитографических процессов, лазерной размерной обработки, подгонки номиналов тонкопленочных резисторов МПП перед проведением бесфлюсовых сборочных операций очищают жидкостным или ионно-плазменным методами.

Применяемые в СВЧ ГИС (МСБ) дискретные конденсаторы на основе полупроводниковых материалов требуют высоких температур сборки, что приводит к деградации параметров микрополосковых структур и самих конденсаторов. Изготовление тонкопленочных конденсаторов в едином технологическом цикле с созданием ММП на подложках из поликора представляет собой сложную техническую проблему, вследствие высокой дефектности подложечного материала. Техпроцесс включает следующие операции (рис.2.34) [6].

Проводится напыление на поликоровую подложку пленки тантала толщиной 0,5-0,8 мкм (а), формирование топологии нижней обкладки конденсатора с выводом и технологическими линиями методом фотолитографии, затем глубокое анодирование тантала (толщиной 0,3-0,5 мкм), напыление методом ВЧ-реактивного распыления пленки двуокиси кремния толщиной 0,5-1,0 мкм (2.34 г). Поверх слоя двуокиси кремния наносится двухслойная структура Та - Си, из которой методом масочной фотолитографии формируются площадки верхней обкладки(2.34 е). Далее через маску фоторезиста жидкостным травлением травится медь, затем фоторезист удаляется и производится плазмохимическое травление слоев Та и двуокиси кремния. После этого в травителе, обеспечивающем селективность травления окиси тантала от тантала, удаляется слой Та О и стравливается медь с верхних обкладок.

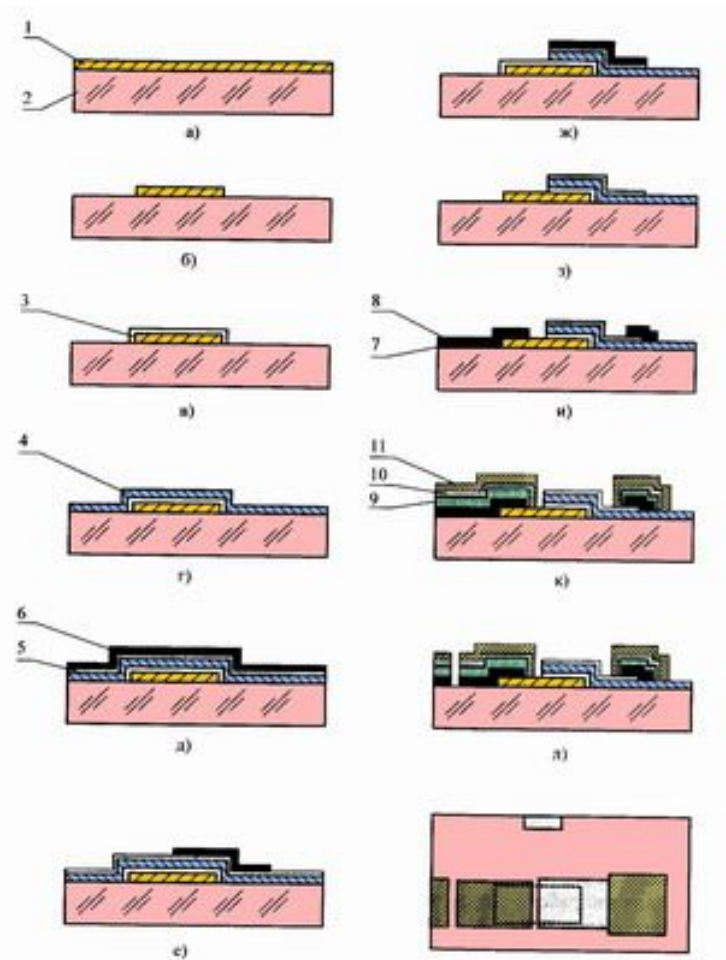


Рис. 2.34 Схема изготовления МПП с тонкопленочными конденсаторами: 1 — подложка (поликор); 2 — пленка тантала Та ($h = 0,6 \text{ мкм}$); 3 — палладий Рд ($h = 0,2 \text{ мкм}$); 4 - пленка двуоксида кремния; 5 - пленка тантала Та ($p = 50 \text{ Ом/р}$); 6 — пленка меди Си ($h = 1 \text{ мкм}$); 7 — подслой хрома Сг ($p = 100 \text{ Ом/р}$); 8 - пленка меди Си ($h=1 \text{ мкм}$); 9 - гальваническая медь Си; 10 — гальванический никель Ni; 11 — гальваническое золото Au.

На подложку после очистки напыляется пленка меди с подслоем хрома, формируется топология проводящего слоя с технологическими линиями методом фотолитографии (здесь предусмотрено перекрытие верхней и нижней обкладок конденсатора).

Далее производится гальваническое наращивание слоев Си, Ni. Au (2.34 л) и удаление технологических линий.

