

И. П. Бушминский, Г. В. Морозов

621.325

Б94

ТЕХНОЛОГИЯ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ

Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Конструирование и производство
радиоаппаратуры»



Москва «Высшая школа» 1980

ББК 32.85
Б90
УДК 621.385.6

Бушминский И. П., Морозов Г. В.

Б90 Технология гибридных интегральных схем СВЧ: Учеб. пособие. — М.: Высш. школа, 1980. — 285 с., ил.

В пер.: 60 к.

В книге рассматриваются технология производства гибридных интегральных микросхем СВЧ-диапазона (ГИС СВЧ); технология получения пленочных элементов ГИС СВЧ; сборки и монтажа навесных активных СВЧ-компонентов, корпусирования ГИС и микросборок СВЧ; маршрутные схемы получения тонко- и толстопленочных элементов и монтажа навесных компонентов; основы технологической оптимизации элементов конструкций ГИС СВЧ; характеристика ГИС СВЧ как объекта производства. Предназначается для студентов радиотехнических факультетов и вузов.

Б $\frac{30407-401}{001(01)-80}$ 93-80

2403000000

6Ф0.3
ББК 32.85

© Издательство «Высшая школа», 1980

ПРЕДИСЛОВИЕ

XXV съезд КПСС поставил серьезные задачи перед радио- и электронной промышленностью, связанные с существенным ростом выпуска продукции. Их решение возможно лишь на основе повышения эффективности производства и качества радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). При подготовке специалистов особенно актуальным стало рассмотрение конструкторско-технологических вопросов, в частности микроэлектронной аппаратуры.

В книге рассматриваются основные вопросы технологии изготовления пленочных гибридных интегральных схем СВЧ-диапазона (ГИС СВЧ), которые играют важную роль в решении проблем комплексной миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Изготовление ГИС СВЧ является сложным процессом по сравнению с пленочными низкочастотными и полупроводниковыми микросхемами. При изложении материала особое внимание уделено особенностям технологии ГИС СВЧ. Но так как конструкции ГИС СВЧ имеют и некоторые общие черты, характерные для всех ГИС, в книге кратко рассматриваются общие вопросы технологии ГИС и основные сведения, касающиеся тонко- и толстопленочной технологии, общей для ГИС, независимо от их функционального значения.

Показателем качества ГИС СВЧ являются их электрические параметры, которые определяются первичными конструкционными параметрами, зависящими от технологии изготовления. В книге показана взаимосвязь точности конструкционных параметров и технологического процесса производства ГИС СВЧ.

При разработке технологического процесса производства ГИС СВЧ его максимальную эффективность можно получить лишь при совместном решении технологических и конструкторских вопросов. Поэтому большое внимание в книге уделено вопросам технологичес-

кой оптимизации конструкций ГИС СВЧ, что позволяет найти технологические допуски (отличные от конструкторских) на первичные конструкционные параметры ГИС СВЧ по критерию минимальной технологической себестоимости годного изделия; рассмотрены общие вопросы технологической оптимизации и методы ее выполнения для наиболее типичных элементов ГИС СВЧ.

При изложении материала авторы использовали отечественные и зарубежные публикации, а также результаты своих исследований.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность докт. техн. наук, проф. В. Б. Пестрякову за полезные замечания и советы, сотрудникам кафедры МАИ, возглавляемой докт. техн. наук, проф. Б. Ф. Высоцким, за внимательный просмотр рукописи, канд. техн. наук, научному редактору О. Е. Бондаренко за ценные замечания при редактировании.

Главы 1 и 3 написаны канд. техн. наук Г. В. Морозовым, главы 4, 5 и 6 — канд. техн. наук И. П. Бушминским, глава 2 — И. П. Бушминским и Г. В. Морозовым.

Авторы будут признательны читателям за полезные советы и замечания по содержанию книги, которые следует направлять по адресу: Москва, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

Глава 1

ГИБРИДНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Использование гибридных интегральных микросхем (ГИС СВЧ) вместе с другими видами микроэлектронных изделий позволяет улучшить технико-экономические показатели микроэлектронной аппаратуры (МЭА). Повышение эффективности производства МЭА неразрывно связано с совершенствованием ее конструкции и технологии изготовления. Гибридные интегральные микросхемы и микросборки СВЧ-диапазона, как составная часть МЭА, имеют конструктивные и технологические особенности. Выбор технологических методов и параметров технологического процесса позволяет оптимизировать конструктивно-технологические решения.

§ 1.1. Конструктивно-технологические особенности

Гибридная интегральная микросхема СВЧ* представляет собой микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию передачи или преобразования СВЧ-сигнала.

Основной частью конструкции ГИС СВЧ является микрополосковая плата, основанием которой является подложка или часть подложки стандартного размера.

Подложку изготавливают из диэлектрических материалов: керамики, ситалла, сапфира или феррита; она служит заготовкой для нанесения на ее поверхность пленочных элементов. Подложка может быть комбинированной, т.е. содержать в одном диэлектрическом материале вставки, например, из феррита.

* Определения основных терминов даны по ГОСТ 17021—75 «Микросхемы интегральные. Термины и определения», ОСТ 4.ГО.073.001 «Микросхемы интегральные гибридные СВЧ-диапазона. Платы микрополосковые ОТУ», ред. 1—72 и ОСТ 4.ГО.010.202 «Микросборки СВЧ-диапазона. Конструирование», ред. 1—76.

На поверхности подложки формируют пленочные элементы с распределенными или сосредоточенными параметрами (микрополосковые линии (МПЛ), резисторы, конденсаторы, индуктивности).

На поверхности микрополосковой платы устанавливают навесные компоненты: диоды, транзисторы, конденсаторы, индуктивности. Их присоединяют к пленочным элементам методами пайки или сварки.

Поверхность подложки, на которой формируются пленочные элементы, называют рабочей. Другая поверхность подложки полностью или частично металлизирована и выполняет функции экрана.

Микрополосковую плату устанавливают в корпус; электрическую связь с другими узлами МЭА осуществ-

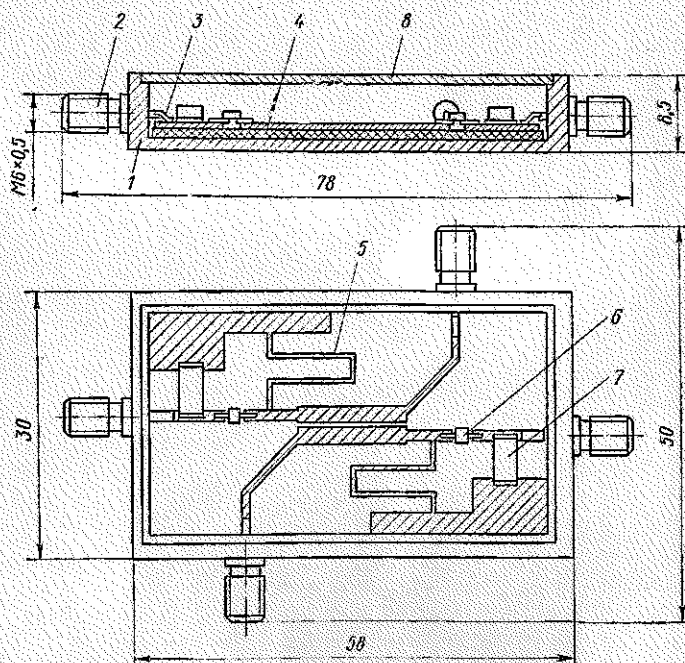


Рис. 1.1. Общий вид ГИС СВЧ:

1 — корпус; 2 — коаксиально-полосковый высокочастотный соединитель; 3 — ленточная перемычка; 4 — микрополосковая плата; 5 — микрополосковая линия; 6 — диод; 7 — конденсатор; 8 — крышка

вляют при помощи коаксиальных высокочастотных соединителей и низкочастотных выводов.

На рис. 1.1 приведен пример конструкции ГИС СВЧ, состоящей из корпуса 1, в котором установлены четыре коаксиально-полосковых высокочастотных соединителя (переходника) 2, служащие для подведения и съема СВЧ-сигнала. Соединители при помощи ленточных перемычек 3 связаны с микрополосковой платой 4, на поверхности которой сформированы пленочные элементы 5 и установлены навесные компоненты — смесительные диоды 6 и конденсаторы 7.

Крышка 8 служит для защиты микрополосковой платы от внешних воздействий и экранирования СВЧ электромагнитного поля.

ГИС СВЧ обычно представляют собой микроэлектронные изделия унифицированной конструкции.

Микросборка СВЧ-диапазона — это микроэлектронное изделие, имеющие самостоятельное функциональное назначение в СВЧ-диапазоне. Оно состоит из корпусных или бескорпусных микрополосковых плат с навесными компонентами или без них, установленных в корпус с коаксиальными высокочастотными соединителями и низкочастотными выводами.

Электрическая связь между отдельными микрополосковыми платами осуществляется при помощи ленточных перемычек или центральных проводников коаксиальных кабелей.

В корпусе могут быть установлены и другие электрорадиокомпоненты. Таким образом, микросборки СВЧ представляют собой микроэлектронные изделия, имеющие большую в сравнении с ГИС СВЧ функциональную сложность. Они разрабатываются специально для конкретной МЭА и являются в отличие от ГИС СВЧ изделиями частного применения.

Схема расположения микрополосковых плат в микросборках СВЧ приведена на рис. 1.2.

Отличия конструкции ГИС и микросборок СВЧ от других типов интегральных микросхем обусловлены следующим: в необходимости создания среды с определенными проводящими и диэлектрическими свойствами для концентрации и передачи электромагнитной энергии, в применении коаксиально-полосковых переходников для подведения и вывода электромагнитной энергии; в применении экранирования для уменьшения

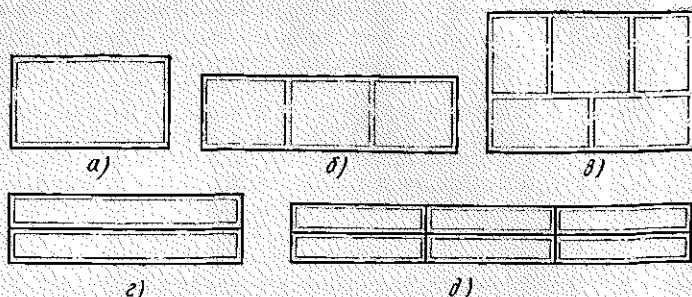


Рис. 1.2. Схемы расположения микрополосковых плат в микросборках СВЧ:

а — одноплатная; *б* — многоплатная одпорядная; *в* — многоплатная многорядная; *г* — многоплатная двусторонняя; *д* — сложная

паразитных связей; в использовании проводящих элементов увеличенной толщины, равной 3—4 скин-слоям, что составляет для схем, работающих на частотах от 2 до 8 ГГц, 4—12 мкм.

Одним из характерных элементов ГИС СВЧ является микрополосковая линия (МПЛ), которая совместно с подложкой и экраном выполняет функции СВЧ — линии передачи. Микрополосковые линии пере-

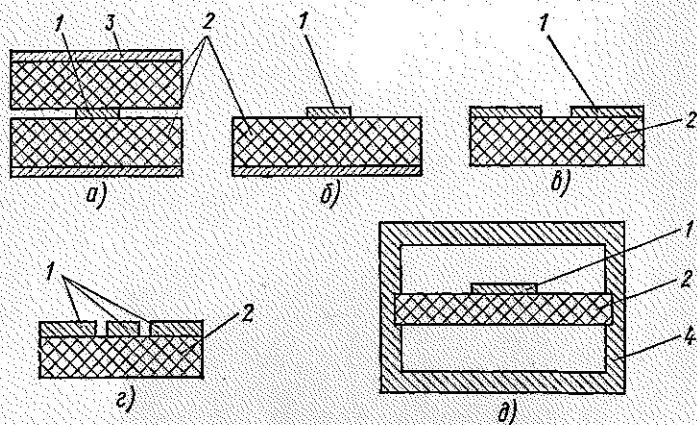


Рис. 1.3. Поперечное сечение микрополосковых линий передачи ГИС СВЧ:

а — симметричная; *б* — несимметричная; *в* — щелевая; *г* — копланарная; *д* — «подвешенной» подложкой; 1 — плоская проводящая металлическая полоска; 2 — плата — диэлектрическое основание; 3 — сплошная металлизированная поверхность; 4 — корпус

дачи СВЧ-энергии имеют следующие разновидности конструкций линий передачи (рис. 1.3): *симметричная, несимметричная, щелевая, копланарная* и линия с «*подвешенной*» подложкой.

В перечисленных конструкциях линий передачи размеры, т.е. длина и ширина МПЛ, определяются расчетным методом, а выбор формы и размещение МПЛ на рабочей поверхности плат производят, исходя из отведенной площади и конструктивных ограничений на топологию*.

ГИС СВЧ, выполненные на элементах с распределенными параметрами, содержат проводники в виде отрезков, расположенных под определенными углами, и радиусных кривых. Это связано с необходимостью более полного использования площади подложки при размещении на ее поверхности проводников МПЛ, длина которых превышает ее размеры. Кроме того, такие ГИС СВЧ могут содержать узкие длинные проводники и зазоры: отношение длины проводника к его ширине составляет для некоторых видов схем до 1500.

Отличительной особенностью ГИС СВЧ, в которой используется несимметричная линия передачи, является наличие на обратной стороне платы металлизированного слоя; в некоторых случаях он не является сплошным, а содержит рисунок, который должен быть точно расположен по отношению к рисунку на рабочей стороне, т.е. плата является двусторонней.

К ГИС СВЧ, у которых создаются функциональные элементы на основе отрезков МПЛ, предъявляются более высокие требования к точности их геометрических размеров и взаимному расположению в отличие от ГИС низкочастотного диапазона, где пленочные проводники выполняют роль коммутационных элементов.

ГИС СВЧ, содержащие элементы с сосредоточенными параметрами, по своей конструкции близки к микросхемам низкочастотного диапазона. Основу технологии ГИС СВЧ составляют методы и процессы, которые нашли широкое применение при создании низкочастотных микросхем широкого функционального назначения.

Пленочные элементы ГИС СВЧ изготавливают по *тонко-* или *толстопленочной* технологии. Различие этих ме-

* Топология — размеры, форма и взаимное расположение пленочных элементов.

тодов заключается в применяемых материалах, способах их нанесения на подложку и формировании конфигураций элементов.

Тонкопленочная технология состоит в осаждении на поверхность подложки сплошных слоев материалов, из которых, используя процессы фотолитографии, получают конфигурации элементов схемы.

Толстопленочная технология включает операции нанесения через механические трафареты на поверхность подложки определенных составов — паст с последующим их вжиганием при высокой температуре.

Тонко- и толстопленочные элементы различаются не только по технологическим признакам, но и по их конструкции.

На рис. 1.4, а, б приведены сечения тонко- и толсто- пленочного проводника МПЛ. Наибольшее применение при формировании тонкопленочного проводника МПЛ получила многослойная структура (рис. 1.4, а), состоящая из трех слоев: нижнего — подслоя, основного слоя

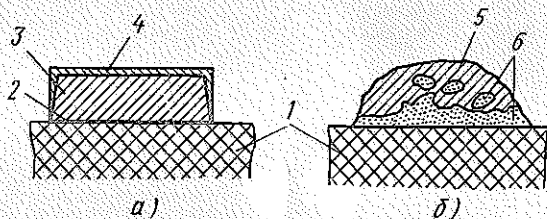


Рис. 1.4. Структура поперечного сечения тонкопленочного (а) и толсто- пленочного (б) проводника МПЛ:

1 — подложка; 2 — нижний адгезионный слой (подслой); 3 — основной проводящий слой; 4 — верхний защитный слой; 5 — проводящий участок; 6 — ди- электрическое связующее вещество

и верхнего защитного слоя. Нижний подслей обеспечи- вает адгезию (сцепление) основного слоя с поверх- ностью подложки. Тонкопленочные проводники МПЛ имеют прямоугольную или трапециевидную форму по- перечного сечения.

Толстопленочные проводники МПЛ состоят из проводящих и диэлектрических участков (рис. 1.4, б); форма их поперечного сечения близка к сегменту.

Параметры пленочных элементов ГИС СВЧ опре- деляются физическими свойствами применяемых мате-

риалов, способами их нанесения и формирования конфигурации.

В табл. 1.1 приведены параметры пленочных элементов ГИС СВЧ.

Таблица 1.1

Наименование элемента	Основные параметры	Значения параметра элемента ГИС	
		тонкопленочные	толстопленочные
Микрополосовые линии	Потери, отн. ед.	1	1,4—1,8
	Толщина проводящего слоя, мкм	4—12	15—30
	Минимальное отклонение, мкм	1	5
	Минимальная ширина, мкм	40	250
	Минимальное отклонение, мкм	10	50
Резисторы	Сопротивление, Ом	20—5·10 ³	
	Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	50—1·10 ³	20—5·10 ³
	Технологический допуск (без доводки, %)	±10	±50
	ТКР, α·10 ⁴ , град ⁻¹	±1	±(2,5—5,0)
	Удельная мощность рассеяния, Вт/см ² :		
	подложки из ситалла	1—3	3
	керамические подложки	10—20	20—30
Конденсаторы	Стабильность при 25°С, 1 год, %	±0,5	±0,5
	Емкости, пФ	0,1—1000	
	Удельная емкость, пФ/см ²	3000—5000	1000—1500
	Тангенс угла потерь	25·10 ⁻⁴	25·10 ⁻³
	ТКС, α·10 ⁴ , град ⁻¹	±2	±10
	Технологический допуск, %	±20	±50
Индуктивности	Стабильность, %	±1	±3
	Величины индуктивностей, мкГн	0,05—0,5	
	Максимальная добротность на частоте 100 МГц	100	30

Микросхемы, содержащие пленочные элементы и навесные компоненты, необходимо защищать от внешних воздействий и прежде всего от воздействия влаги.

ГИС и микросборки СВЧ корпусируют, исходя из специфических особенностей разрабатываемой МЭА, с учетом обеспечения тактико-технических требований и условий эксплуатации. Микросхемы и микросборки имеют индивидуальную защиту или могут быть защищены от внешних воздействий в составе МЭА. При индивидуальной защите микрополосковые платы помещают в герметичные корпуса.

По конструкции корпуса делятся на *чашечные, рамочные и пенальные* (рис. 1.5).

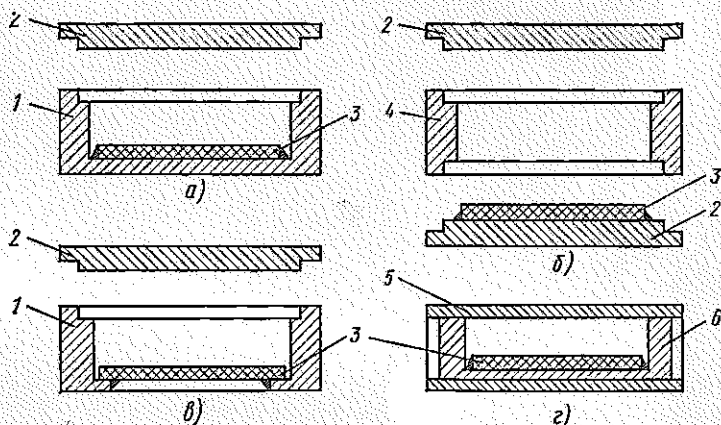


Рис. 1.5. Основные типы конструкций корпусов ГИС СВЧ:

а — чашечный; б, в — рамочный; в — пенальный; 1 — корпус; 2 — крышка; 3 — плата; 4 — рамка; 5 — полая трубка прямоугольного сечения; 6 — П-образное основание

В корпусах *чашечного* типа (рис. 1.5, а) плату непосредственно устанавливают на дно корпуса, а затем осуществляют электрическое соединение внутреннего проводника СВЧ-соединителя с соответствующими элементами платы. В корпусах этого типа дно выполняют заодно со стенками, в которых расположены разъемы.

Недостатки корпусов чашечного типа связаны с неудобством размещения и монтажа платы на дне корпуса и трудностью проверки правильности выполнения операций сборки. Кроме того, в случае повреждения платы или неработоспособности микросхемы имеются затруднения с ее удалением.

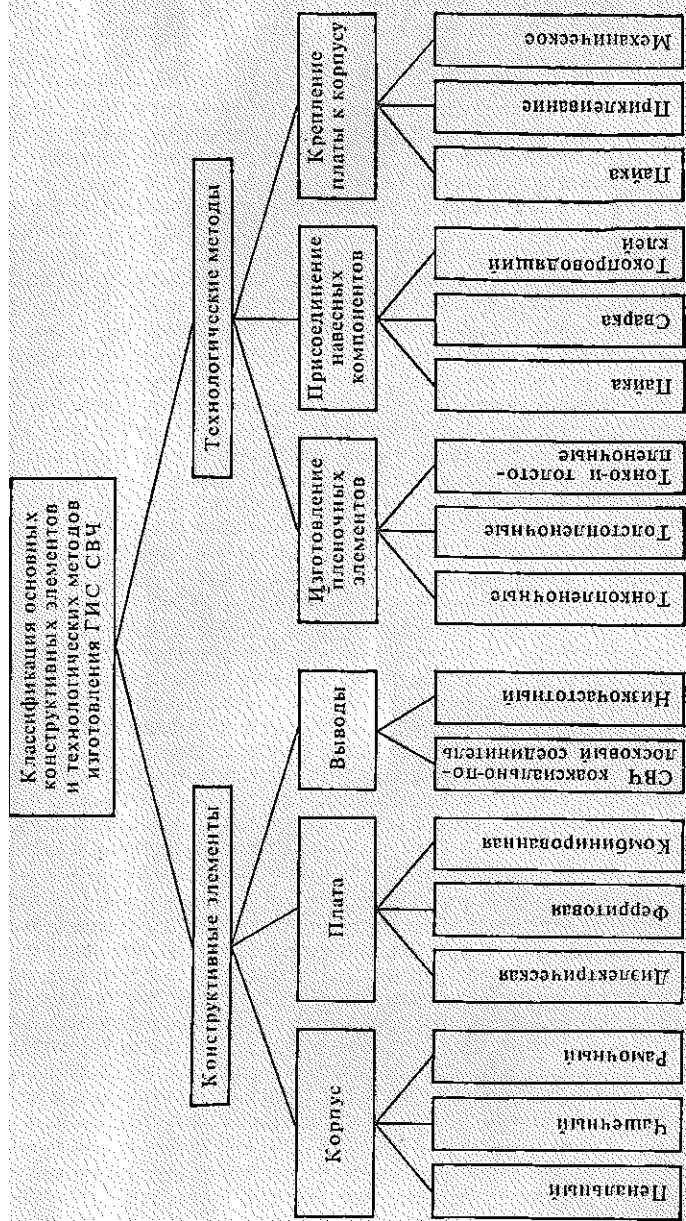


Рис. 1.6. Классификация конструктивных элементов ГИС и микросборок СВЧ и методов их изготовления

В корпусах рамочного типа (рис. 1.5, б, в) крышка, рамка и дно корпуса представляют собой отдельные детали. СВЧ коаксиально-полосковые соединители устанавливаются в рамке. Устанавливать плату можно непосредственно на нижнюю крышку (рис. 1.5, б) или к рамке (рис. 1.5, в).

Достоинства корпуса рамочного типа, изображенного на рис. 1.5, б, связаны с удобством сборки и монтажа микросхемы платы и возможностью замены деталей, в частности платы, в случае порчи ее при сборке и монтаже.

Корпус пенального типа (рис. 1.5, г) состоит из поллой трубки прямоугольной формы, во внутренней полости которой расположено П-образное основание с отогнутыми краями, в которых размещены СВЧ коаксиально-полосковые соединители. В качестве корпуса может быть использован отрезок прямоугольного волновода. Сборка и монтаж микросхемы производится на П-образном основании, которое затем вводится во внутреннюю полость корпуса и герметизируется.

В некоторых случаях микрополосковые схемы, не содержащие навесных компонентов, размещают в негерметичных корпусах, а для защиты их от воздействия влаги применяют лаки и компаунды.

Возможны также варианты защиты ГИС или микросборок СВЧ в составе МЭА, где они вместе с другими компонентами и устройствами защищаются от внешних воздействий общим герметичным кожухом.

Анализ конструкций ГИС и микросборок СВЧ и методов их изготовления позволяет выявить общие конструктивные элементы и обобщить технологические методы изготовления.

На рис. 1.6 приведена классификация конструктивных элементов ГИС и микросборок СВЧ и методов их изготовления.

§ 1.2. Общая характеристика производства

Производственный процесс* — совокупность всех действий людей и орудий производства, необходимых на данном предприятии для изготовления изделий.

* Определения основных терминов даны в соответствии с ГОСТ 31109—73 ЕСТД «Процессы технологические. Основные термины и определения», 1975.

Производство ГИС СВЧ относится к группе сложных производств, характер которого определяется конструктивно-технологическими особенностями этих изделий, многономенклатурностью, длительностью производственного цикла, нестабильностью процента выхода годных изделий, наличием значительной доли ручного труда.

При создании производственных цехов по изготовлению ГИС СВЧ необходимо учитывать следующие факторы: 1) наличие на предприятии некоторых специальных производств, в частности производства металлостеклянных спаев, механической обработки подложек, металлообработки; 2) степень технологической совместимости ряда процессов, используемых в производстве толсто- и тонкопленочных ГИС СВЧ (монтажа навесных компонентов, корпусирования и герметизации, изготовления фотошаблонов и др.); 3) профессиональную подготовку операторов на основных операциях производственного цикла: фотолитографии, напыления, вжигания, микросварки и микропайки и измерений параметров; 4) обеспечение электронно-вакуумной гигиены, т. е. определенной температуры, влажности и запыленности воздушной среды.

Производственная структура цеха, выпускающего ГИС и микросборки СВЧ, т. е. состав его производственных участков и форма их взаимосвязей, определяются принятым технологическим процессом изготовления ГИС СВЧ.

Технологический процесс — это часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния предмета производства.

Специфика технологии изготовления ГИС СВЧ обусловлена: конструктивными особенностями активных компонентов и пленочных элементов, в частности повышенной толщиной и сложностью конфигураций проводников МПЛ, наличием проводящих элементов на обратной стороне платы. Кроме того, технология изготовления ГИС СВЧ должна обеспечить повышенную точность геометрических размеров (ширины и длины) проводников микрополосковых линий, размещения рисунка на плате по отношению к ее краям, совмещения рисунков на двусторонних платах. Необходимо также обеспечить повышенную точность механической обработки полостей

корпуса и габаритных размеров платы, установки компонентов по отношению к проводникам микрополосковых линий, установки плат в корпус по отношению друг к другу и к СВЧ коаксиально-полосковому соединителю.

Технологический процесс производства ГИС СВЧ состоит из комплекса различных технологических процессов, которые объединяются по своему назначению и средствам их реализации и сосредоточиваются в отдельных производственных помещениях, представляющих собой участки или отделения. Между отдельными производственными участками и отделениями в процессе изготовления ГИС СВЧ устанавливаются определенные производственные связи.

Отдельные технологические процессы в зависимости от количества одновременно обрабатываемых деталей делятся на процессы групповой и индивидуальной обработки.

К *групповой обработке* относятся вакуумное напыление, фотолитографическая обработка, электрохимическое осаждение, трафаретная печать, вжигание, химическая очистка. *Индивидуальная обработка* применяется практически на всех этапах сборки и монтажа компонентов на плате, корпусирования и герметизации ГИС СВЧ, при механической обработке корпусов, соединителей.

Характеристика основных процессов изготовления ГИС и микросборок СВЧ приведена в табл. 1.2.

Классификация процессов по характеру происходящих превращений приведена в табл. 1.3.

ГИС СВЧ, как изделия с общими конструктивно-технологическими признаками, изготавливают по *типовым технологическим процессам*, которые характеризуются единством содержания и последовательностью большинства технологических операций. Так, осаждение тонких пленок в вакууме применяют для создания проводников МПЛ, резистивных, емкостных и индуктивных элементов. Для получения этих же элементов в толстопленочной технологии используют методы трафаретной печати и вжигания паст. При помощи процессов фотолитографии можно получить любой рисунок элементов ГИС СВЧ, обеспечив требуемую точность.

Монтаж различных видов навесных компонентов, отличающихся по своим конструктивно-технологическим характеристикам, осуществляется также по типовым

Таблица 1.2

Наименование технологического процесса	Характерные особенности	Область применения
Нанесение пленочных структур		
Термическое испарение	Большой арсенал приемов испарения Высокий рабочий вакуум в камере Относительная простота процесса	Для получения прецизионных многослойных структур
Ионное (катодное) распыление	Хорошая адгезия осаждаемых пленок Большая равномерность толщины пленок Неизменность химического состава распыляемого материала	Распыление сплавов и тугоплавких материалов
Ионно-термическое испарение	Высокая скорость испарения и хорошая адгезия осаждаемых пленок	Для нанесения проводящих пленок большой толщины
Электрохимическое осаждение	Необходимость наличия на подложке проводящего подслоя	Утолщение проводящих элементов МПЛ и нанесение защитного покрытия на МПЛ
Химическое осаждение	Необходимость активации диэлектрической поверхности	Создание электропроводящего подслоя
Трафаретная печать	Простота механического нанесения паст через трафарет	Нанесение защитного покрытия Для получения схем с невысокими требованиями к точности геометрических размеров элементов
Получение рисунка элементов схем		
Фотолитография	Наличие процессов индивидуальной обработки фоторезистивного слоя	Для микросхем, содержащих элементы малых размеров, с узкими зазорами между элементами и малыми допусками на размеры элементов

Продолжение табл. 1.2

Наименование технологического процесса	Характерные особенности	Область применения
Установка и монтаж навесных компонентов		
Микропайка	Необходимость предварительной подготовки присоединяемых поверхностей, а также применение вспомогательных материалов: припоев, флюсов	Для присоединения компонентов, имеющих «массивные» выводы, компонентов безвыводных (типа конденсаторов К10-17), а также компонентов с шариковыми выводами
Микросварка	Получение физического контакта отдельных элементов за счет воздействия тепла, давления или ультразвуковых колебаний	Для присоединения элементов, имеющих проволочные или балочные выводы
Герметизация		
Сварка	Необходимость наличия у корпусов тонких (0,5—1 мм) кромок	Для небольших размеров корпусов ГИС
Пайка	Сваренный корпус разгерметизации не подлежит Необходимость нагрева всего устройства до температуры расплавления припоя Возможность осуществления разгерметизации корпуса	Для корпусов ГИС СВЧ относительно больших размеров
Механическая обработка		
Скрайбирование подложек	Необходимость разделения (ломки) подложки на платы и шлифование торцев	Для подложек из ситалла и поликора толщиной не более 0,5 мм
Резка подложек алмазными дисками	Необходимость введения зазора между разрезаемыми платами, равного ширине алмазного диска + (0,1—0,15) мм	Для подложек из ситалла, поликора, ферритов толщиной более 1 мм
Фрезерование с использованием станков с ЧПУ	Необходимость разработки программы; для относительно больших партий	Для изготовления сложных корпусов, содержащих большое число микрополосковых плат

Таблица 1.3

Характер превращений	Наименование процесса
Физические	Термическое испарение, ионное распыление, вакуумно-термическое испарение, сварка, пайка
Химические	Очистка подложек и испаряемых материалов, травление пленочных структур, растворение фоторезистивных слоев, осаждение защитных покрытий
Физико-химические	Вжигание паст, электрохимическое осаждение для утолщения проводников МПЛ, осаждение защитных покрытий на проводники МПЛ и детали корпуса
Фотохимические	Облучение фоторезистора
Механические	Резка подложек, алмазное сверление отверстий, обработка деталей корпуса, нанесение паст на подложку, сборка компонентов, сборка ГИС СВЧ

технологическим процессам пайки или сварки. Использование этих процессов ускоряет и удешевляет стоимость технологических разработок, снижает трудоемкость и повышает качество изготавливаемых ГИС СВЧ.

При изготовлении конкретных типов ГИС СВЧ необходимо уточнять порядок выполнения типовых операций, применяемого оборудования и технологических режимов. Для этого разрабатывают маршрутные карты (МК), содержащие описание в определенной последовательности производственных и контрольных операций с указанием применяемого оборудования, оснастки, материалов и трудовых нормативов. В МК приводятся также ссылки на технологические инструкции, по которым выполняется данная операция. Упрощенным вариантом маршрутных карт, отражающим только содержание и последовательность основных технологических операций, являются маршрутные технологические процессы (МТП).

Основные МТП изготовления микросхем, содержащих пленочные элементы и навесные компоненты, и сборки ГИС СВЧ, даны в приложении.

Вариантность приведенных МТП отражает прежде всего конструктивно-технологическую сложность ГИС СВЧ.

При выборе маршрутного технологического процесса изготовления ГИС СВЧ необходимо исходить из

предъявляемых к ним технических требований, конструктивно-технологических особенностей пленочных элементов технологической совместимости применяемых материалов и используемого оборудования.

Простейшими являются ГИС СВЧ, платы которых содержат только микрополосковые линии. Они могут быть изготовлены по МТП № I а и б, которые позволяют получать микросхемы с минимальными (до 40 мкм) размерами проводников и зазоров между ними.

При выборе МТП можно руководствоваться следующими положениями. Наличие большого числа разобращенных проводников в топологии схемы предопределяет выбор в пользу МТП, содержащего операции фотолитографии с применением негативного фоторезиста. Его использование исключает применение при электрохимическом утолщении проводящих элементов вспомогательных перемычек (проволочных или пленочных), объединяющих элементы платы в замкнутую электрическую цепь, которые необходимо удалить после того, как рисунок элементов сформирован.

У микросхем, содержащих небольшое число разобращенных элементов, для получения требуемого рисунка можно использовать позитивный фоторезист. Следует также отметить, что фотолитографическую обработку с использованием позитивного фоторезиста целесообразно применять для микросхем, содержащих узкие (менее 40 мкм) линии и зазоры, так как разрешающая способность его выше.

Для получения ГИС СВЧ с высокой добротностью и воспроизводимостью геометрических размеров можно рекомендовать метод прямого травления толстых пленок (МТП № II а и б).

Для изготовления ГИС СВЧ с резисторами может быть использована МТП № III. В микросхемах, содержащих резисторы, существенным является номинальное значение удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки, из которой формируют резисторы и подслоя проводящих элементов.

Низкоомные (до 100 Ом) резисторы, которые формируются из материала с удельным поверхностным сопротивлением 50—100 Ом/кв, имеют толщину резистивной пленки в несколько десятков долей микрометра. Это не позволяет использовать резистивный слой в качестве адгезионного подслоя для проводников МПЛ,

ак как значительно возрастают потери. Травление толстых» резистивных пленок также затруднено, поэтому, изготавливая ГИС СВЧ с низкоомными резисторами и используя схемы МТП № III а и б, отдельно формируют резистивный слой резисторов и адгезионный подслой. Для получения таких микросхем можно использовать хром или нихром.

При изготовлении микросхем, содержащих резисторы, которые формируются из материала с удельным поверхностным сопротивлением 100—300 Ом/кв, он может быть одновременно использован и в качестве подслоя проводников МПЛ (МТП № III в и г). В этом случае материалом резистивного слоя может служить также хром или нихром.

Если в ГИС СВЧ содержатся резисторы, имеющие сопротивление в несколько килоом (например, в СВЧ усилителях), то для их получения используют резистивный материал с удельным поверхностным сопротивлением 500 Ом/кв и выше. В таких ГИС СВЧ приходится использовать два резистивных материала (МТП № III д и е): один высокоомный (например, металлоицидные сплавы или металлокерамические смеси) для формирования резисторов, другой (например, хром) в качестве адгезионного подслоя проводников МПЛ и проводящего слоя экрана.

По МТП № IV можно изготовить ГИС СВЧ, содержащие проводники, резисторы и пленочные конденсаторы. Особенность этих МТП в отличие от ранее приведенных состоит в том, что для формирования конфигураций пленочных элементов используют механические гаски и технику фотолитографии.

Изготовление плат ГИС СВЧ по толстопленочной технологии в зависимости от типов входящих в схему элементов приведено в МТП № V а — в.

МТП № VI а и б содержат технологические операции сборки и монтажа навесных компонентов и герметизации ГИС СВЧ. МТП № VI а и б различаются в зависимости от того, каким способом присоединяется плата к корпусу: пайкой или при помощи токопроводящего клея.

Выбранные методы изготовления ГИС СВЧ и технологические способы их реализации должны обеспечить не только получение заданных электрических и эксплуатационных характеристик, но также быть и экономичными.

Экономичность является важнейшей характеристикой любого производства, в том числе ГИС и микросборок СВЧ.

§ 1.3. Техничко-экономические характеристики

Внедрение ГИС СВЧ в МЭА кроме расширения ее функциональных возможностей и улучшения технических характеристик способствует снижению ее стоимости.

Уменьшение стоимости связано с одновременным изготовлением большого количества микрополосковых плат, содержащих пленочные элементы; применением высокопроизводительных групповых методов обработки, что снижает трудоемкость и время обработки; снижением материалоемкости конструкции; применением типовых технологических процессов, что позволяет повысить уровень механизации и автоматизации; ограничением номенклатуры конструкционных материалов, что облегчает подготовку и материально-техническое снабжение.

При организации производства пленочных ГИС СВЧ и выборе варианта технологического процесса необходимо оценить затраты на оборудование, материалы и стоимость рабочей силы.

Важнейшим показателем, характеризующим уровень производства, является себестоимость выпускаемой продукции.

Себестоимость ГИС СВЧ складывается из стоимости основных и вспомогательных материалов комплектующих изделий, стоимости рабочей силы, т.е. заработной платы производственных рабочих и соответствующих начислений на нее, стоимости технического обслуживания, ремонта и амортизации оборудования и накладных расходов.

В общем виде полная себестоимость ГИС СВЧ

$$C = B + D + \frac{A}{\sum_{i=1}^n K_i} + E, \quad (1.1)$$

где B — стоимость материалов и комплектующих изделий; D — заработная плата производственных рабочих с начислениями; A — амортизационные отчисления (определяются по нормативным данным); E — накладные

расходы; $\sum_{i=1}^n K_i$ — количество изделий различных партий, изготовленных за определенный (амортизационный) период.

Производство ГИС СВЧ — многооперационный процесс, состоящий из нескольких десятков основных технологических операций.

Каждая операция характеризуется показателем технологических потерь*:

$$Y = N_{бр}/N_{общ}, \quad (1.2)$$

где Y — показатель технологических потерь, т.е. доля бракованных изделий; $N_{бр}$ — число бракованных изделий; $N_{общ}$ — общее количество изготовленных изделий.

Зная показатель технологических потерь, можно определить коэффициент выхода годных на i -й операции

$$q_i = 1 - Y_i \quad (1.3)$$

и оценить общий коэффициент выхода годных ГИС СВЧ при отсутствии взаимосвязи между причинами, вызывающими брак:

$$\Theta = q_1, q_2, \dots, q_i, \quad (1.4)$$

где $q_1, q_2, \dots, q_i$ — коэффициент выхода годных на 1, 2, ..., i -й операции технологического процесса.

Стоимость материалов, приходящихся на одну схему, целесообразно представить в виде доли стоимости материалов, расходуемых при обработке:

групповой

$$B_r = \frac{B_{r1}}{n_1 q_1} + \frac{B_{r2}}{n_2 q_2} + \dots + \frac{B_{ri}}{n_i q_i} = \sum_{i=1}^n \frac{B_{ri}}{n_i q_i}, \quad (1.5)$$

где $B_{r1}, B_{r2}, \dots, B_{ri}$ — стоимость материалов, расходуемых при групповой обработке на отдельных операциях (химической очистке подложек, вакуумном напылении, химическом травлении и др.); $n_1, n_2, \dots, n_i$ — количество одновременно обрабатываемых плат (схем);

* Здесь и далее экономические расчеты ведутся в предположении, что брак является невосстанавливаемым.

индивидуальной

$$B_{\text{и}} = \frac{m_1 B_{\text{и}1}}{q_1} + \frac{m_2 B_{\text{и}2}}{q_2} + \dots + \frac{m_k B_{\text{и}k}}{q_k} = \sum_{k=1}^l \frac{m_k B_{\text{и}k}}{q_k}, \quad (1.6)$$

здесь $B_{\text{и}1}, B_{\text{и}2}, \dots, B_{\text{и}k}$ — стоимость материалов, расходуемых на отдельных операциях индивидуальной обработки (например, при изготовлении корпуса, припайки компонентов и др.); $m_1, m_2, \dots, m_k$ — количество (вес, поверхность) обрабатываемых изделий.

Стоимость комплектующих изделий ($B_{\text{кн}}$), входящих в ГИС СВЧ, непосредственно зависит от количества изделий разных типов ($p_1, p_2, \dots, p_i$) и стоимости каждого ($B_{\text{к}1}, B_{\text{к}2}, \dots, B_{\text{к}i}$), т. е.

$$B_{\text{кн}} = p_1 B_{\text{к}1} + p_2 B_{\text{к}2} + \dots + p_j B_{\text{к}j} = \sum_{j=1}^m p_j B_{\text{к}j}. \quad (1.7)$$

При оценке экономичности ГИС СВЧ, содержащих резисторы и конденсаторы, следует учесть возможность их реализации в пленочном виде или использования в качестве покупных дискретных компонентов.

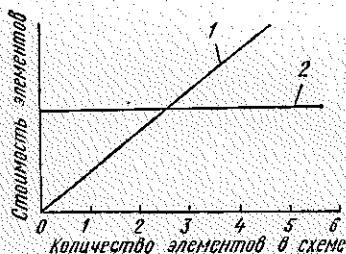


Рис. 1.7. Относительная стоимость элементов от их количества в схеме:

1 — дискретных, 2 — пленочных

Можно отметить два условия, при которых использование дискретных компонентов дешевле: 1) при выпуске малой серии ГИС СВЧ и 2) при наличии в схеме небольшого числа элементов.

На рис. 1.7 приведены графики относительной стоимости элементов схемы в зависимости от их числа. Как видно из графика, если число элементов в схеме один или два, то выгоднее использовать дискретные компоненты. При числе элементов свыше трех очевидны экономические преимущества пленочных элементов.

Стоимость рабочей силы также представлена в виде двух составляющих D_r и $D_{\text{и}}$ — стоимость рабочей силы на операциях групповой и индивидуальной обработки. По аналогии с выражениями (1.5) и (1.6)

$$D_r = \frac{D_{r1}}{n_1 q_1} + \frac{D_{r2}}{n_2 q_2} + \dots + \frac{D_{ri}}{n_i q_i} = \sum_{i=1}^n \frac{D_{ri}}{n_i q_i}, \quad (1.8)$$

$$D_{\Pi} = \frac{m_1 D_{\Pi 1}}{q_1} + \frac{m_2 D_{\Pi 2}}{q_2} + \dots + \frac{m_k D_{\Pi k}}{q_k} = \sum_{k=1}^l \frac{m_k D_{\Pi k}}{q_k}, \quad (1.9)$$

где $D_{r1}, D_{r2}, \dots, D_{ri}$ и $D_{\Pi 1}, D_{\Pi 2}, \dots, D_{\Pi k}$ — стоимость рабочей силы на операциях групповой и индивидуальной обработки.

Подставляя выражения (1.5)–(1.9) в выражение (1.1), объединяя (1.5) с (1.8), (1.6) с (1.9), получим

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{(B_{ri} + D_{ri})}{n_i q_i} + \sum_{k=1}^l \frac{m_k (B_{\Pi k} + D_{\Pi k})}{q_k} + \sum_{j=1}^m p_j B_{hj} + \frac{A}{\sum_{i=1}^n k_i} + E. \quad (1.10)$$

Из анализа выражения (1.10) следует, что чем больше схем можно изготовить при групповой обработке и чем больше коэффициент выхода годных, тем ниже себестоимость изделия.

При выборе варианта технологического процесса отпадает необходимость в расчете полной себестоимости. При этом целесообразно рассмотреть только ту часть себестоимости, которая отражает экономичность сравниваемых вариантов технологического процесса или отдельных его операций. Эта часть себестоимости носит условный характер и называется технологической себестоимостью.

Иногда, сравнивая варианты технологического процесса, отдельные элементы себестоимости надо рассматривать в относительных единицах (стоимость оборудования, материалов), а также сравнивать некоторые показатели производственного процесса (трудоемкость изготовления изделий, его продолжительность и др.).

Проведем анализ некоторых технико-экономических характеристик тонко- и толстопленочной технологии, которые приведены в табл. 1.4–1.6 и на рис. 1.9.

При определении характеристик табл. 1.4 были приняты условно равными объемы производства, процент

выхода годных, параметры схем, что не дает точной картины действительных характеристик производства ГИС СВЧ. Но в данном случае реальные затраты не играют большой роли, тем более что стоимость оборудования и материалов, так же как и процент выхода изделий, не остаются неизменными. Существенным является нахождение сравнительных характеристик производства тонко- и толстопленочных ГИС СВЧ.

Процессы I группы в производстве тонко- и толстопленочных схем отличаются по применяемым материалам и оборудованию, однако стоимостные затраты на оборудование и материалы различаются незначительно.

Процессы II, IV, V, VI и VII групп однотипны, т.е. выполняются на одном и том же оборудовании, с использованием одних и тех же технологии и материалов.

Отличие применяемого оборудования, материалов и характеристик производственного цикла относится к

Таблица 1.4

Группа процессов	Наименование процесса	Относительная стоимость				Относительная трудоемкость		Относительная продолжительность производственного цикла	
		оборудования		материалов					
		тонкопленочные	толстопленочные	тонкопленочные	толстопленочные	тонкопленочные	толстопленочные	тонкопленочные	толстопленочные
I	Подготовка материалов	1	1,5	1	1,2	1	1,1	1	1
II	Изготовление фотошаблона	1	1	1	1	1	1	1	1
III	Получение пленочной структуры	1	0,98	1	15	1	0,34	1	0,9
IV	Монтаж навесных компонентов	1	1	1	1	1	1	1	1
V	Корпусирование	1	1	1	1	1	1	1	1
VI	Настройка и предварительные испытания	1	1	1	1	1	1	1	1
VII	Герметизация	1	1	1	1	1	1	1	1

группе процессов, связанных с получением пленочной структуры.

Далее приведены данные по группе процессов III (табл. 1.4).

Стоимость вакуумного напылительного и фотолитографического оборудования относится к стоимости оборудования для трафаретной печати и термического оборудования для обжига примерно как 1:0,8. Однако в производстве толстопленочных схем необходимо иметь еще и оборудование для изготовления сетчатых трафаретов (установки для нанесения эмульсии, экспонирования, проявления, сушки). Это соотношение изменится и станет равным примерно 1:0,94.

Считая, что стоимость оборудования для изготовления тонкопленочной структуры (группа III) составляет примерно 30% от стоимости полного комплекта оборудования для производства ГИС СВЧ, получим соотношение стоимости полного комплекта оборудования для производства тонко- и толстопленочных ГИС СВЧ как 1:0,98.

Относительную стоимость основных материалов, расходуемых на изготовление тонко- и толстопленочных схем, можно оценить из данных табл. 1.5.

Таблица 1.5

Наименование материала	Схемы		Наименование материала	Схемы	
	тонкопленочные	толстопленочные		тонкопленочные	толстопленочные
Подложки	1*	1	Резистивные	0,9	—
Серебро	1*	—	сплавы	—	—
Медь	0,15	—	Пасты:	—	—
Нихром	0,03	—	Pd—Ag	—	2,5
			Pt—Pd—Ag	—	3,9

Примечание. Стоимости даны по отношению к величинам, обозначенным звездочкой.

Стоимость подложек пленочных ГИС СВЧ составляет примерно следующие соотношения: поликор — силталл — керамика 1:0,4:0,3.

Относительную стоимость материалов, используемых для получения проводников микрополосковых линий,

можно оценить следующим образом. Примем толщину проводника равной 10 мкм. Тонкопленочный проводник состоит из 80% меди и 20% защитного покрытия, например серебра. Относительная стоимость такого двухслойного проводника относится к стоимости проводника из одного серебра как 0,24:1. Стоимость толстопленочного проводника такой же толщины из палладиево-серебра

Таблица 1.

Наименование операции	Трудоемкость изготовления одной схемы* (основное время ч)
а. Тонкопленочная технология	
Очистка подложек и материалов	0,028
Вакуумное напыление (двухслойной структуры одновременно с двух сторон подложки)	0,05
Фотолитографическая обработка (двукратная):	
нанесение фоторезиста	0,0050
сушка	0,0016
экспонирование	0,0160
проявление	0,0132
снятие фоторезиста	0,02
ретушь элементов	0,10
Химическое травление (двукратное)	0,04
Электрохимическое наращивание:	
основного слоя (8 мкм)	0,10
защитного слоя (2 мкм)	0,03
Визуальный контроль	0,025
Итого . . .	0,4288
б. Толстопленочная технология	
Изготовление двух видов трафаретов	0,005**
Очистка подложек	0,025
Подготовка и хранение пасты	0,001
Трафаретная печать (структура «проводник — резистивный слой» и металлизация обратной стороны)	0,018
Вжигание (двукратное)	0,020
Подгонка резисторов	0,150
Визуальный контроль	0,025
Итого . . .	0,144

* Для расчета принята условная схема, содержащая проводники и резисторы и металлизацию обратной стороны.

** Удельная трудоемкость изготовления трафарета, отнесенная к одной схеме.

ряной пасты составляет по отношению к стоимости проводника из серебра 2,5:1. Таким образом, отношение стоимости материалов, используемых для изготовления тонко- и толстопленочных проводников, составляет примерно 1:10.

Это отношение значительно увеличивается при сравнении стоимости материалов, используемых для получения резистивных пленок по тонко- и толстопленочной технологии. Разница в стоимости получается за счет более дорогих материалов — паст, используемых для получения толстопленочных резисторов по сравнению с материалами, используемыми в тонкопленочной технологии, а также за счет того, что толщина толстопленочного резистора значительно превышает толщину тонкопленочного. Так, например, толщина резистивного слоя сопротивлением 100 Ом/кв, полученного на основе кремниевого резистивного сплава, используемого в тонкопленочной технологии, составляет около 0,4 мкм, а толщина резистора, полученного нанесением пасты в толстопленочной технологии для той же величины сопротивления, составляет 8—10 мкм.

Даже при одинаковой стоимости кремниевого резистивного сплава и резистивной пасты соотношение стоимости материалов тонко- и толстопленочного резистора составляет примерно 1:20.

Таким образом, относительная стоимость материалов, необходимых для изготовления пленочных элементов условной схемы, содержащей проводники, резисторы и конденсаторы в тонко- и толстопленочном варианте, составит примерно 1:15.

В табл. 1.6 приведены данные по трудоемкости выполнения отдельных операций получения пленочных элементов в тонко- и толстопленочной технологии.

Как видно из данных таблицы, трудоемкость получения пленочных элементов по толстопленочной технологии приблизительно в три раза меньше по сравнению с трудоемкостью тонкопленочной технологии.

Однако общая трудоемкость изготовления ГИС СВЧ будет зависеть и от других процессов, приведенных в табл. 1.4.

Полагая приближенно трудоемкость изготовления пленочных элементов от общей трудоемкости изготовления ГИС СВЧ равной 20% и используя данные табл. 1.4 по относительной трудоемкости отдельных процессов,

получим соотношение трудоемкости изготовления тонко- и толсто пленочных ГИС СВЧ, равное 1:0,86.

На рис. 1.8. приведена диаграмма технологического цикла получения пленочных элементов ГИС СВЧ методами тонко- и толсто пленочной технологии. Диаграмма построена для идеального случая, когда число техно-

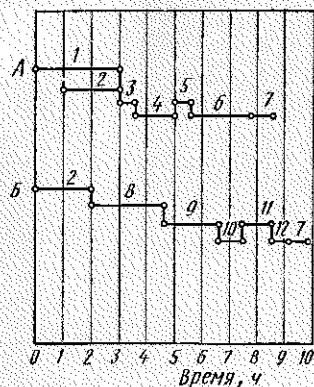


Рис. 1.8. Диаграмма технологического цикла изготовления пленочных элементов ГИС СВЧ:

А — по толсто пленочной технологии; Б — по тонко пленочной; 1 — изготовление трафаретов; 2 — химическая очистка подложек; 3, 5 — трафаретная печать первого и второго слоев; 4, 6 — вжигание первого и второго слоев; 7 — контроль; 8 — вакуумное нанесение; 9, 11 — фотолитографическая обработка первого и второго слоев; 10 — электрохимическое осаждение; 12 — химическое травление

логических установок и количество работающих достаточно для параллельного выполнения операций, а все необходимые материалы и вспомогательная оснастка подготовлены к работе. При ее построении не учитывался также размер партии.

Приведенные на рисунке диаграммы поясняют вклад отдельных операций в общий технологический цикл получения пленочных элементов и показывают, через какое время можно получить первую схему с нанесенным рисунком, после того как будут изготовлены фотошаблоны.

Таким образом, тонко пленочная технология имеет значительные преимущества по сравнению с толсто пленочной: она позволяет реализовать в 4—5 раз меньшие предельные размеры элементов схем с большей в 5—6 раз точностью. Достоинством тонко пленочной

технологии является также меньшая стоимость материалов, используемых для получения пленочных элементов

Толсто пленочная технология имеет следующие достоинства: меньшие затраты на капитальное строительство помещений отдельных участков, так как требования к параметрам воздушной среды ниже; меньшую трудоемкость и продолжительность производственного цикла.

Глава 2

МАТЕРИАЛЫ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ

Проблема выбора материалов для ГИС СВЧ является достаточно сложной, учитывая высокие требования к электрическим характеристикам и надежности.

В производстве ГИС СВЧ вступают во взаимодействие различные вещества и материалы, принимающие участие в физико-химических превращениях. К ним относятся металлы, сплавы, диэлектрики, металл-диэлектрические смеси и химические вещества.

§ 2.1. Общая характеристика

ГИС СВЧ создаются с использованием большой номенклатуры материалов, которые могут быть разделены на основные и вспомогательные.

К *основным* относятся те материалы, которые в процессе изготовления изделия становятся его составной частью, обеспечивая требуемые электрические и эксплуатационные характеристики. К основным материалам относятся: подложки, резистивные, проводящие и диэлектрические составы, из которых формируются пленочные элементы.

Показатели физико-механических свойств этих материалов используют для расчета электрических и тепловых параметров ГИС СВЧ.

Свойства материалов подложек и пленочных элементов обеспечивают в готовом изделии основные электрические функции. Эти материалы выделяют в *первую* основную группу.

Следует отметить, что в процессе формирования конструкций ГИС СВЧ происходит изменение физико-химических свойств исходных конструкционных материалов, зависящее от параметров технологического про-

цесса, что не всегда учитывается при расчете ГИС СВЧ

Для получения законченного изделия материалы только первой группы недостаточно. Необходим корпус для защиты схем от внешних воздействий, клей — для прикрепления плат к основанию корпуса, припой — для монтажа навесных элементов, проволоочные или ленточные перемычки — для различного рода соединений внутри изделия.

Все эти материалы становятся составной частью изделия, обеспечивая его работоспособность, и образуют *вторую* основную группу.

К вспомогательным материалам можно отнести те, которые участвуют в процессе изготовления ГИС СВЧ: кислоты, щелочи, растворители, фоторезисты, флюсы и др. От чистоты этих материалов зависит качество ГИС СВЧ, ее эксплуатационные характеристики и показатели надежности.

Далее рассмотрены характеристики материалов подложек, проводящих, резистивных и диэлектрических пленок и корпуса. Виды и свойства основных химических веществ, припоев, клеев приведены в гл. 3.

§ 2.2. Подложки

Подложкой называется технологическая заготовка, предназначенная для нанесения на нее пленочных элементов и межэлементных или межкомпонентных соединений. Материал подложки и его обработка оказывают существенное влияние на параметры формируемых элементов, следовательно, на надежность и точность электрических параметров всей микросхемы.

Основное назначение подложки в технологическом процессе, с одной стороны, состоит в том, чтобы служить механически прочной и химически стойкой основой, способной выдерживать сложные тепловые, механические и химические воздействия при образовании пленочных элементов. С другой стороны, находясь в составе устройства, подложка становится составной частью ГИС СВЧ; в ней сосредотачиваются поля СВЧ. Поэтому свойства ГИС СВЧ в значительной мере зависят от электрических свойств подложки.

Основные требования к материалам подложки ГИС СВЧ: хорошая обрабатываемость механическим способом, химическая стойкость, отсутствие газовыделений

высоком вакууме, высокая теплопроводность, низкая пористость, согласованность температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) с ТКЛР материалов наносимых пленок, высокая и стабильная диэлектрическая проницаемость, малый тангенс угла диэлектрических потерь, высокое удельное электрическое сопротивление, низкая себестоимость.

Перечисленные требования к подложкам ГИС СВЧ в большой степени определяются структурой, химической чистотой, плотностью материала, а также микрорельефом и химическим состоянием их поверхности. В свою очередь физико-механические свойства подложек зависят от используемых исходных материалов и технологии их переработки.

На рис. 2.1 приведена структура подложек, изготовленных из мелких и крупных частиц. Между размером частиц и шероховатостью поверхности материала подложек существует взаимосвязь. Для керамики на основе окиси алюминия эти данные приведены в табл. 2.1.

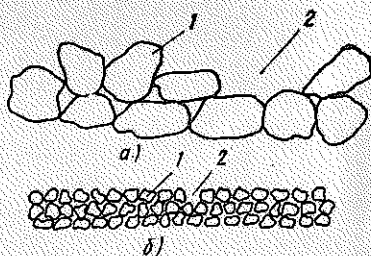


Рис. 2.1. Профиль поверхности подложек со структурой частиц:

а — с «грубой»; б — с «мелкой»; 1 — частица вещества; 2 — пора

Таблица 2.1

Температура обжига, °С	Средний диаметр частиц, мкм	Параметр шероховатости R_a , мкм
1460	0,74	0,06
1485	0,86	0,07
1500	1,04	0,07
1525	1,36	0,09

Рассмотрим, чем обусловлены перечисленные требования к материалам подложек ГИС СВЧ.

Одним из важнейших параметров материала подложек ГИС СВЧ как функциональных элементов конструкции являются *относительная диэлектрическая про-*

ницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Для повышения степени интеграции ГИС СВЧ желательно применять подложки с высоким значением ϵ . При этом снижаются потери на излучение МПЛ, поскольку большая часть электромагнитного поля концентрируется в области диэлектрика под проводником микрополосковой линии.

Однако при высоких значениях ϵ материала подложек легко возбуждаются поверхностные волны, такие материалы характеризуются сравнительно низкими значениями температур точек Кюри и сильной зависимостью ϵ от температуры. Это вынуждает выбирать материалы подложек с $\epsilon = 8 \div 10$.

Чем однороднее материал подложки, тем стабильнее величина его диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость материала подложки

$$\epsilon_n = \epsilon_1 \left[\frac{\epsilon_2 (1 - 3V) + 2\epsilon_1}{\epsilon_1 + (2 - 3V) \epsilon_2} \right], \quad (2.1)$$

где ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость частиц (зерен) керамического материала; ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость пор (воздуха); V — относительный объем, занимаемый порами.

В свою очередь

$$V = \gamma_0 / \gamma - 1, \quad (2.2)$$

где γ_0 — теоретическая плотность пористого керамического материала, равная $3,983 \text{ г/см}^3$; γ — действительная плотность материала подложки.

Зависимость диэлектрической постоянной керамики на основе окиси алюминия от величины плотности приведена на рис. 2.2.

Стабильность ϵ зависит от технологии получения подложки. Подложки, изготовленные по керамической технологии, характеризуют

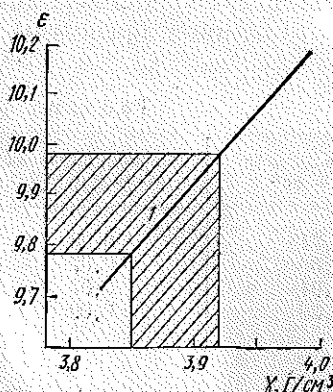


Рис. 2.2. Зависимость ϵ подложек на основе Al_2O_3 от плотности:

1 — область типичных значений

ся, как правило, большим разбросом диэлектрической проницаемости, который определяется размером зерна, его ориентацией и плотностью материала. Так, величина ϵ подложек на керамики «Поликор» находится в пределах от 9,75 до 9,90. Экспериментальные исследования показывают, что разброс диэлектрической проницаемости для подложек ГИС СВЧ можно охарактеризовать законом нормального распределения (рис. 2.3). Методы определения степени влияния разброса по ϵ на электрические параметры элементов ГИС СВЧ подробно рассмотрим в § 5.3.

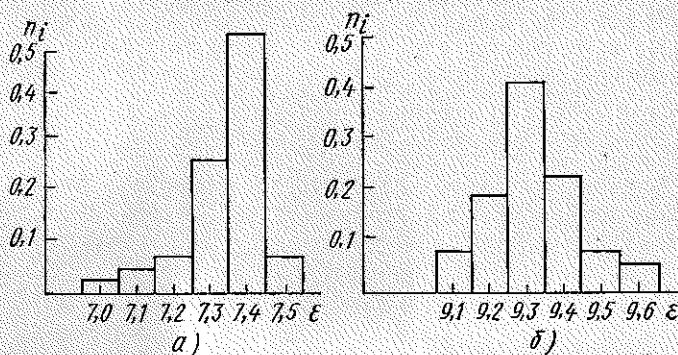


Рис. 2.3. Гистограмма распределения величины ϵ подложки:
а — из ситалла СТ-38-1; б — из керамики 22ХС; η_i — частота

Величина $\text{tg} \delta$ определяет погонные диэлектрические потери и добротность МПЛ. Получение материалов с низкими потерями связано с проблемой обеспечения их высокой чистоты. Чистые материалы легче поддаются шлифовке и полировке, имеют более высокую диэлектрическую проницаемость, меньшую пористость, большую механическую и электрическую прочность, меньший $\text{tg} \delta$, лучшую теплопроводность, большее удельное сопротивление; обладают мелкозернистой структурой, что облегчает проведение процессов фотолитографии.

На рис. 2.3 и 2.4 приведены зависимости величины $\text{tg} \delta$ керамики на основе окиси алюминия с присадкой окиси магния от температуры обжига и плотности.

В табл. 2.2 приведены значения потерь в проводнике $a_{\text{п}}$ и диэлектрике $a_{\text{д}}$ в зависимости от химической чистоты материала подложки и степени ее обработки R_a .

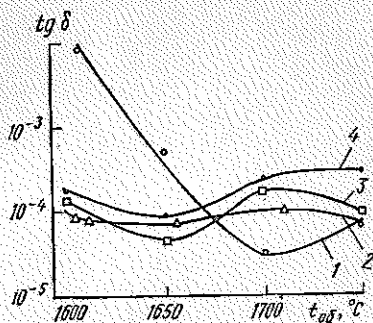


Рис. 2.4. Влияние температуры обжига на величину $\operatorname{tg} \delta$ (при $f=1$ МГц) керамики на основе Al_2O_3 с добавками MgO : 0 (1); 0,25 (2); 0,35 (3) и 0,10 (4) вес. %

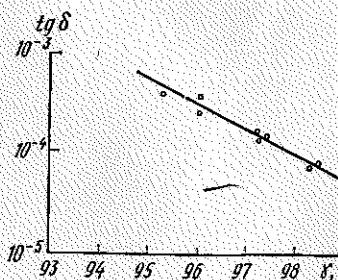


Рис. 2.5. Зависимость величины $\operatorname{tg} \delta$ (при $f=1$ МГц) от температуры керамики на основе Al_2O_3 с присадкой MgO

Высокое удельное электрическое сопротивление подложки определяет электрическую прочность МПЛ, высокая теплопроводность подложки обеспечивает уменьшение температурного градиента на ее поверхности и снижение общего уровня нагрева за счет отвода тепла на корпус ГИС СВЧ.

С повышением частоты электрическая прочность диэлектрических материалов снижается.

Таблица 2.2

Содержание Al_2O_3 в подложке, %	$R_{a'}$, мкМ	a_{II} , дБ/ед. дл., на частоте f , ГГц			$a_{д'}$, дБ/ед. дл.
		10	2	0,2	
99,5	0,01	0,1	0,22	0,21	0,0025
96	0,02	0,15	0,23	0,74	0,015
85	0,05	0,20	0,34	0,85	0,038

На рис. 2.6 показана зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от частоты: 1 — для поликора, 2 — керамики 22ХС, 3 — бериллиевой керамики. Видно, что с ростом частоты $E_{пр}$ уменьшается почти в два раза.

Температурный градиент по поверхности и объему подложки может вызвать ее растрескивание. Значение критического перепада температур рассчитывают по формуле

$$\Delta T_{кр} = \sigma (1 - \nu) / \alpha E, \quad (2.3)$$

где σ — предел механической прочности при растяжении; ν — коэффициент Пуассона; α — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль Юнга.

Величина $\Delta T_{кр}$ составляет: для поликора 70; брокерита 65 и керамики 22ХС 180°С.

При создании СВЧ-микросхем большое значение имеет качество поверхности подложки, под которым следует понимать величину шероховатости и размеры поверхностных дефектов в виде пор, впадин, царапин, заусенцев.

Указанные дефекты в производстве ГИС СВЧ влияют на такие параметры, как предельная минимальная ширина проводника, электрические и эксплуатационные характеристики пленочных элементов. Выход годных микросхем часто определяется именно этими дефектами, вызывающими появление разрывов проводников, резисторов, замыкание обкладок или снижение пробивного напряжения в пленочных конденсаторах. При металлизации пористой поверхности поры заполняются металлом и образуется металлическое «острие», направленное в глубь подложки, что создает малые неоднородности в МПЛ и приводит к увеличению потерь.

Металлизированные поры изменяют толщину проводника МПЛ и толщину диэлектрика. Это приводит к местному изменению величины волнового сопротивления, увеличению КСВН и изменению реактивных параметров схемы.

Рассмотрим, как связана пористость подложки с дефектами полоскового проводника. Пусть поверхностная плотность дефектов подложки (пор) $\bar{N}$, а линейная плотность — $\bar{l}$. Тогда $\bar{N} = N/s$; $\bar{l} = M/l$, где N — общее число дефектов; s — исследуемая площадь; l — общая длина полосковых проводников. Значение M характеризует число повреждений полоскового проводника, обус-

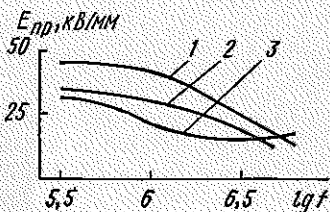


Рис. 2.6. Зависимость электрической прочности керамических материалов от частоты:

1 — поликор; 2 — керамика 22ХС; 3 — брокерит

ловленных подложкой. В предположении, что дефекты подложки распределены случайно, независимо друг о друга, и вероятность их попадания на площадь S зависит только от величины площадки, их распределение определяется законом Пуассона:

$$P(m) = \frac{(\bar{m})^m \exp(-\bar{m})}{m!}, \quad (2.4)$$

здесь $P(m)$ — вероятность того, что событие произойдет m раз, если математическое ожидание равно $\bar{m}$.

Если известно распределение поверхностных дефектов по размерам, то можно определить плотность дефектов полоскового проводника $\bar{f}$. Предполагая, что поверхностный дефект можно представить в виде круга диаметром d , равным x , положим, что размер дефекта равен величине перекрытия круга с полосковым проводником. Перекрытие будем считать поврежденным, если его величина превосходит некоторый заданный параметр δ . Вероятность того, что дефект с диаметром x в пределах x и $x+dx$ перекрывает единичную длину полоскового проводника на величину, большую, чем δ , есть $P(x)dx$, причем

$$\begin{aligned} P(x)dx &= 0 \text{ при } x \leq \delta; \\ P(x)dx &= 2 \left(\frac{w+x}{2} - \delta \right) \bar{N}(x) dx \text{ при } x \geq \delta, \end{aligned}$$

где w — ширина полоскового проводника. Учитывая распределение дефектов по размерам, получим общее число дефектов

$$N = \int_{x_0}^{x_m} \bar{N}(x) dx \quad (2.5)$$

и общую линейную плотность повреждений

$$\bar{f}_1 = \int_{x_0}^{x_m} P(x) dx, \quad (2.6)$$

где x_0 и x_m — наименьший и наибольший диаметры дефектов.

Для поликора экспериментальные исследования дают $\bar{m}=4,4$, для сапфира $\bar{m}=2,5$, а для брокерита $\bar{m}=10,2$. Распределение пор по их эквивалентному диа-

метру для этих диэлектриков показано на рис. 2.7. Из данных зависимостей следует, что

$$\bar{N}(x) = A \exp(-Bx),$$

тогда

$$\bar{N} = A/B [\exp(-Bx_0) - \exp(-Bx_m)], \quad (2.7)$$

$$f_1 = A/B [(w - \delta + 1/B) - 1/B \exp(-Bm - B\delta)] \times \\ \times \exp(-B\delta) - Aw 1/B \exp(-Bx_m). \quad (2.8)$$

При помощи этого выражения можно найти линейную плотность дефектов полоскового проводника шириной w . Степень их влияния на электрические параметры полосковых линий рассмотрена в § 5.2.

Важным является требование высокой чистоты обработки диэлектрической подложки. Шероховатость поверхности проводников, обращенной к подложке, определяется шероховатостью последней. Это будет определять четкость и точность рисунка схемы, высокочастотные потери в проводниках, надежность сосредоточенных элементов ГИС СВЧ — конденсаторов и резисторов.

Шероховатость поверхности микрополосковых проводников ведет к росту активных потерь в линии. Это обусловлено тем, что за счет поверхностного эффекта токи СВЧ в проводниках текут в тонком поверхностном слое. Шероховатость поверхности вызывает потерю эффективной поверхности, т. е. длины пути поверхностных токов по сравнению с гладкой поверхностью. Приращение длины пути вызывает приращение активных потерь в проводниках. Для того, чтобы количественно оценить приращение путей поверхностных токов, введем понятие коэффициента шероховатости, равного отношению длины микропрофиля шероховатой поверхности к длине идеально гладкой поверхности на участке полосковой линии протяженностью не менее длины волны. Коэффициент шероховатости определяется геометрией микронеровностей (углом при их вершине).

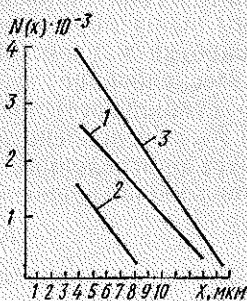


Рис. 2.7. Распределение пор по диаметру для диэлектрических подложек ГИС СВЧ:

1 — поликор; 2 — сапфир;
3 — брокерит

Наносимый на диэлектрик металл полностью воспроизводит очертания его поверхности, т. е. микрорельеф поверхности проводников, «сцепленных» с диэлектриком, определяется микрорельефом поверхности последнего. Если для обработки поверхности диэлектрика используется абразив, то значения коэффициентов шероховатости относительно стабильны при обработке различных диэлектриков абразивами с одинаковой зернистостью. Статистический анализ показал, что значения коэффициента шероховатости — величины случайные, распределенные по нормальному закону. Значения математических ожиданий стабильны и зависят от величины зерна абразива. Дисперсия определяется методом обработки и свойствами обрабатываемого материала.

Исследование формы микронеровностей показало, что стабильность значений коэффициента шероховатости K_m обусловлена тем, что каждому абразиву соответствует определенный наиболее вероятный угол при вершине микронеровностей α :

$$K_m = \operatorname{cosec}(\alpha/2). \quad (2.9)$$

Величина зерна абразива является определяющим фактором не только для значений α , но и для высоты микронеровностей на поверхности диэлектрика:

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &= 2\pi/3 \{1 - \exp[-0,3(R_a + 2,33)]\}; \\ \alpha_{\text{ном}} &= 2\pi/3 \{1 - \exp[-0,29(R_a + 2,3)]\}; \\ \alpha_{\min} &= 2\pi/3 \{1 - \exp[-0,12(R_a + 7)]\}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

При помощи данных выражений процесс определения величины K существенно упрощается и сводится к нахождению значений R_a по стандартной методике. В табл. 2.3 приведены экспериментальные данные в среднем значении параметров шероховатости поверхностей подложек из сапфира и поликора, обработанные суспензиями на основе электрокорунда белого (ЭБ), карбида кремния (КЗ) и алмазного порошка (А).

Значения коэффициентов шероховатости для сапфира и поликора можно определить на основе данных, приведенных в табл. 2.3 с использованием выражения (2.10).

При расчете влияния микронеровностей на величину затухания, вызванного активными потерями в полостях проводниках, необходимо учитывать не только ге-

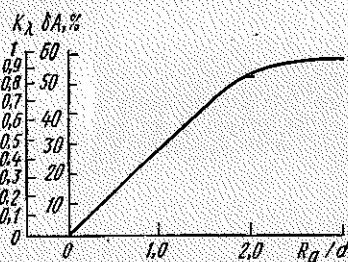
Таблица 2.3

Вид обработки	Характеристика абразива	Параметры шероховатости поверхности, мкм	
		R_a	R_z
Шлифование суспензий: на основе ЭБ	ЭБ 4	0,63	4
	ЭБМ 28	0,44	2,35
	ЭБМ 20	0,32	1,82
	ЭБМ 14	0,22	1,31
	ЭБМ 10	0,17	1
	ЭБМ 7	0,12	0,76
на основе КЗ	КЗ 4	0,72	4,4
	КЗМ 28	0,5	2,64
	КЗМ 20	0,36	2,03
	КЗМ 14	0,25	1,59
	КЗМ 10	0,19	1,23
	КЗМ 7	0,13	0,83
на основе А	АМ 40/28	0,64	4,2
	АМ 20/14	0,36	2,2
	АМ 7/5	0,21	1

метрические изменения длины поверхности, но и рабочую частоту. Для одного и того же микро-рельефа изменение активных потерь, вызванное шероховатостью токонесущей поверхности, будет различным при неодинаковых рабочих частотах. Это обусловлено тем, что с изменением частоты изменяется и условная глубина проникновения — толщина *скин-слоя* d .

Приращение активных потерь зависит от соотношения параметра шероховатости R_a и условной глубины проникновения d . Чем больше R_a/d , тем ближе длина пути поверхностного тока к длине микро-рельефа токонесущей поверхности.

На рис. 2.8 показана зависимость приращения затухания от величины R_a/d . Ее можно описать выражением

Рис. 2.8. Зависимость изменения затухания от величины R_a/d

$$K_\lambda = \operatorname{th}(R_a/1,8d), \quad (2.11)$$

где K_λ — частотная поправка.

С учетом частотной поправки и коэффициента шероховатости влияние микронеровностей на величину активных потерь может быть учтено через коэффициент потерь

$$K = 1 + K_\lambda (K_m - 1). \quad (2.12)$$

На рис. 2.9 приведены кривые зависимости коэффициента потерь от высоты микронеровностей для различных длин волн передаваемого сигнала, полученные из (2.12). Активные потери для шероховатой токонесущей поверхности возрастают в K раз.

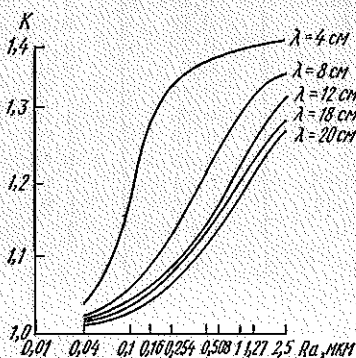


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента потерь K от параметра шероховатости R_a

Шероховатость поверхности диэлектрика определяет также дефекты границы полоскового проводника и минимально достижимую величину зазора между проводниками и их ширину. Глубину дефектов границы проводника d_1 рассчитывают как функцию наиболее вероятного угла при вершине

микронеровностей и их высоты R_a :

$$d_1 = 2R_a \operatorname{tg} \alpha/2. \quad (2.13)$$

В табл. 2.4 приведены (без учета подтравливания) значения минимальной ширины полоскового проводника и зазора в зависимости от высоты микронеровностей на поверхности диэлектрика.

Таблица 2.4

Параметр шероховатости R_a , мкм	Минимальная ширина полоскового проводника, мкм	Минимальный зазор между полосковыми проводниками, мкм
0,6	150	175
0,25	62	75
0,05	25	37

При изготовлении пленочных конденсаторов толщина металлических обкладок и диэлектрика равна нескольким микрометрам. Для того чтобы избежать короткого замыкания обкладок или электрического пробоя конденсатора, шероховатость поверхности подложки должна быть значительно меньше толщины пленки. Поэтому при низком качестве поверхности подложки трудно изготовить высоконадежные тонкопленочные конденсаторы с большой удельной емкостью.

В производстве толстопленочных конденсаторов толщина обкладок и диэлектрика составляет один-два десятка микрометров. В этом случае шероховатость поверхности подложки в меньшей мере влияет на качество конденсаторов.

При малых толщинах пленок неоднородность толщины проводника определяется величиной шероховатости поверхности подложки. При увеличении толщины проводящей пленки высота микровыступов на поверхности металлического слоя увеличивается из-за роста размеров зерна. С их ростом увеличивается степень неоднородности изолирующей пленки по толщине, что приводит к снижению максимальной электрической прочности. В табл. 2.5 показана зависимость $E_{\text{пр max}}$ от толщины нижнего электрода в структуре «Al-боросиликатное стекло — Al» (толщина диэлектрика 0,7 мкм).

Таблица 2.5

Толщина нижнего электрода, мкм	$E_{\text{пр max}} \cdot 10^{-6}$, В/см	Толщина нижнего электрода, мкм	$E_{\text{пр max}} \cdot 10^{-6}$, В/см
0,7	2,1	4,0	1,1
2,0	1,2	5,0	0,8

Шероховатость подложки влияет на характеристики пленочных элементов. Если величину микронеровностей можно сравнить с толщиной резистивного слоя, то воспроизводимость характеристик резисторов на различных подложках получают при условии одинаковой обработки поверхности.

В табл. 2.6 приведены относительные величины сопротивления пленок никрома равной толщины, осажденных на различные подложки; на рис. 2.10 показано влия-

Таблица 2.6

Материал подложки	Относительная величина сопротивления
Стекло	1
Сапфир (полированный)	1
Керамика из Al_2O_3 (глазурованная)	1
Крупнозернистая керамика из Al_2O_3	2
Мелкозернистая керамика из Al_2O_3	3—4

ние шероховатости поверхности подложки на величину удельного сопротивления пленок меди.

Между размером зерна материала подложки и адгезией существует взаимосвязь. Малые по размеру зерна способствуют возникновению большего числа центров

кристаллизации, что улучшает адгезию пленки с подложкой.

На рис. 2.11 приведена схема, поясняющая это явление. Шероховатость поверхности и размеры дефектов подложки в технологическом цикле не остаются неизменными. При воздействии повышенной температуры шероховатость поверхности изменяется. Для шлифованных поверхностей керамических подложек, выпускаемых промышленностью, наиболее характерны микронеровности высотой 2,5—3 мкм. При температурных воздействи-

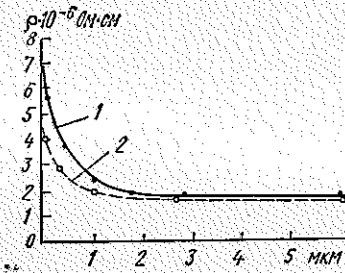


Рис. 2.10. Зависимость удельного сопротивления пленок меди от толщины, осажденных на подложку из керамики на основе Al_2O_3 , имеющей различную шероховатость:

1 — $R_a = 0,1$ мкм; 2 — $R_a = 0,025$ мкм

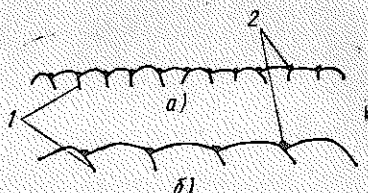
ях (600—800°С) количество микронеровностей возрастает. Если в состоянии поставки шаг микронеровностей лежит в пределах 15—20 мкм, то после двукратной термообработки шаг микронеровностей сокращается до 10—15 мкм. При этом класс шероховатости поверхности не изменяется. Но растет коэффициент $K_{ш}$, так как под воздействием высокой температуры и внутренних напряжений на поверхности подложки из межкристаллического пространства вытесняется стеклофаза. Чем мень-

ше в фазовом составе материала стеклофазы, тем слабее выражено это явление.

При обработке подложек в травящих составах за счет травления по границам зерен увеличивается высота микронеровностей и уменьшается их шаг, так же увеличивается глубина и диаметр пор. При обработке ситалловых подложек в различных химических растворах возможно избирательное травление отдельных фаз.

Рис. 2.11. Схематическое изображение образования центров кристаллизации на различных поверхностях поликристаллических подложек:

a — с «мелким» зерном; *б* — с «крупным» зерном; 1 — границы зерен; 2 — центры кристаллизации



На рис. 2.12 приведены кривые распределения глубины пор на поверхности ситалла СТ-38-1 до (кривая 1) после химической обработки (кривые 2 и 3). Обработка проводилась при температуре 90°С в течение 20 мин в растворе: тринатрийфосфат (30 г), калий углекислый (20 г), порошок «Новость» (7 г) в воде (1 л) (кривая 2) и в течение 10 с при температуре 75°С в растворе: серная кислота (100 мл), соляная кислота (100 мл), в воде (100 мл).

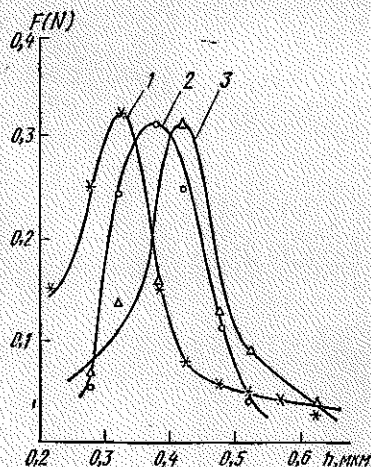


Рис. 2.12. Плотность распределения $F(N)$ глубины пор в подложках из ситалла СТ-38-1:

1 — до обработки; 2, 3 — после обработки в растворах

Требование к точности геометрических размеров подложки (в частности ее толщины) обусловлено тем, что подложка, являясь технологической заготовкой и конструкционным элементом микросхемы, становится средой, в которой распространяются электромагнитные волны СВЧ.

Методы количественной оценки степени влия-

пия нестабильности перечисленных параметров на электрические характеристики элементов ГИС СВЧ с распределенными параметрами рассмотрены в § 5.2.

Требования к отсутствию газовыделения в вакууме при действии повышенных температур, химической стойкости и частично согласованности ТКЛР материалов подложки и наносимых пленок обусловлены спецификой технологических процессов, применяемых для изготовления ГИС СВЧ. Они характеризуют возможность применения подложек в этих процессах.

Характеристики наиболее широко используемых конструкционных материалов подложек ГИС СВЧ приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Наименование материалов	Тип	Удельный вес, г/см ³	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ град ⁻¹ в интервале 20—200° С	Коэффициент теплопроводности, Вт/Х м ⁻¹ град ⁻¹ при 20° С	Диэлектрическая проницаемость ϵ на частоте 10 ⁶ Гц при 20—300° С	Тангенс угла диэлектрических потерь tg $\delta \times 10^4$ на частоте 10 ⁶ Гц при 20—300° С
Ситалл	СТ-32-1	3,19	32	1,045	10	3—5
	СТ-38-1	2,9	38	1,31	7,25—7,5	2—10
Керамика	СТ-50-1	2,65	50	—	8,2	50
	Поликор	4,0	75	25—37,7	9,6—9,8	0,2—0,5
	Сапфир	3,93	66,6	23	11,4 (II оси) 13,2 (I оси)	1
	Сапфирит	3,96	62	21—25	9,3—10,1	1—1,1
	ГМ	4	64	21—25	9,5—10	0,5—1,2
	22ХС	3,65	60	13,1	9,2—9,4	10
	Брокерит	2,90	60	210,0	6,4—6,6	2—5
Ферриты	10СЧ-6	5,02	49—61	2,59	13,8—16,3	70
	30СЧ-6	3,9	50—78	—	8,5—10,5	20

Ситаллы представляют собой стеклокристаллические материалы на основе окислов металлов: лития, алюминия, кальция, магния, титана, кремния и др. Ситалл отличается от стекла наличием однородной и развитой кристаллической структуры, которая занимает от 50 до 90% всего объема. Благодаря наличию кристаллической фазы ситалл имеет лучшие по сравнению со стеклом физико-механические свойства.

Для получения ситаллов могут быть использованы различные стеклообразующие системы и катализаторы.

Наиболее широко используются ситаллы на базе стекол в системах: $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—CaO—MgO—F}$; $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—B}_2\text{O}_3\text{—PbO—F}$; $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—CaO—MgO—TiO}_2$ и др.

Для ситалла характерна плотная микроструктура, подобная структуре керамических материалов на основе чистых окислов.

Диэлектрические потери в ситаллах определяются составом и структурой кристаллической фазы, а также наличием стекловидной фазы. Величина тангенса угла диэлектрических потерь для различных видов ситаллов составляет от 2 до $50 \cdot 10^{-4}$.

Ситаллы имеют высокую химическую стойкость к воздействию различных средств, используемых при химической очистке поверхности, а также к воздействию травительных растворов, применяемых в процессе фотолитографической обработки.

В производстве ГИС СВЧ ситаллы используются в виде пластин размерами 60×48 мм, толщиной 0,5 и 1 мм.

Керамика широко применяется в качестве материала подложек ГИС СВЧ. Но не каждый вид керамики удовлетворяет требованиям, предъявляемым к подложкам.

Для керамик и особенно многокомпонентных характерны нестабильность, неоднородность свойств как в партии подложек, так и в пределах площади одной подложки, что обусловлено спецификой технологических процессов их изготовления и является следствием: некачественного помола, приводящего к неоднородному размеру зерна; добавок связующего вещества, не реагирующего с основными компонентами в процессе спекания; неравномерной по объему плотности прессования.

Широко применяется глиноземистая керамика, имеющая диэлектрическую постоянную около 9,7, что позволяет значительно уменьшить размеры схемы.

По сравнению с другими видами керамических материалов керамика на основе окислов алюминия имеет лучшие свойства: низкие диэлектрические потери, небольшие изменения диэлектрических параметров ϵ и $\text{tg } \delta$ с изменением температуры, хорошую их стабильность.

Свойства глиноземистой керамики зависят от процента содержания корунда и способа получения исходной окиси алюминия.

Некоторые показатели физико-механических и электрических свойств глиноземистой керамики в зависимости от процента содержания Al_2O_3 приведены в табл. 2.8 и 2.9.

Таблица 2.8

Наименование свойств	Содержание Al_2O_3 , %	
	97	99,7
Плотность, г/см ³	3,7	3,99
Остаточная пористость, %	7,5	0,2
Предел прочности при сжатии, Н/мм ²	31	46
Предел прочности при изгибе, Н/мм ²	3,1	5,4
Удельное сопротивление при 100° С, Ом·см	10 ¹³	10 ¹⁴
Напряжение пробоя, кВ/мм	18	30

Таблица 2.9

Наименование свойств	Содержание Al_2O_3 , %			
	85	96	99,5	99,8
Диэлектрическая проницаемость ϵ	8,0	8,9	9,5	9,8
Тангенс угла диэлектрических потерь $\lg \delta$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Керамика с содержанием корунда Al_2O_3 99,8% и выше выпускается под названием «Поликор» и представляет собой поликристаллический высокоглиноземистый корундовый материал, который характеризуется минимальной пористостью (менее 0,5%). Подложки из поликора отличаются повышенной химической и термической стойкостью.

Поликоровые подложки выпускаются размерами 30×24 и 60×48 мм, имеют точную геометрическую форму и высокую чистоту поверхностей. Отклонения габаритных размеров не превышают 0,02 мм. Чистота обработки поверхности соответствует требованиям 14-го класса (высота неровностей $R_z=0,03-0,05$ мкм).

Сапфир, представляющий собой монокристаллическую окись алюминия с содержанием Al_2O_3 99,6%, бывает природным и синтетическим. Последний получают ориентированным вытягиванием по методу Чохральско-

го. Свойства синтетического сапфира зависят от направления измерения: перпендикулярно или параллельно оси кристалла. Так, например, на частоте $3 \cdot 10^3$ Гц при температуре 25°C величина диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\text{tg } \delta$ составляют перпендикулярно оси $\epsilon = 8,6$; $\text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-4}$; параллельно оси $\epsilon = 10,55$; $\text{tg } \delta = 1 \cdot 10^{-4}$.

Монокристаллический сапфир имеет ряд преимуществ по сравнению с поликристаллическим. Этот диэлектрик более однороден по своим свойствам, имеет высокую плотность. Его поверхность может быть обработана до высокой чистоты. Поэтому сапфир применяются в тех случаях, когда необходимы высокое разрешение и наибольшая однородность электрических свойств. Из-за высокой стоимости область применения сапфира ограничена прецизионными высокомоощными СВЧ-схемами. По мере усовершенствования методов выращивания и обработки сапфира стоимость его будет снижаться. Сапфир выпускается в виде пластин диаметром до 100 мм.

Бериллиевая керамика имеет хорошие диэлектрические свойства и отличную термическую проводимость, но она трудно обрабатывается. Кроме того, пыль, возникающая при механической обработке, является токсичной: это вредно для здоровья и приводит к большим затратам на создание средств техники безопасности. Бериллиевая керамика может применяться для создания высокомоощных СВЧ-схем.

Керамика на основе окиси бериллия с содержанием $\text{BeO } 97\%$ называется «Брокеритом».

Ферриты представляют собой класс материалов, в которых удачно сочетаются свойства полупроводников, диэлектриков и ферромагнетиков. Поэтому их использование в качестве материала подложек ГИС СВЧ позволяет создавать новый вид устройств, в которых возможно ввести управление свойствами за счет внешнего магнитного поля.

Ферритовые элементы могут служить составной частью так называемой «комбинированной» подложки, представляющей собой диэлектрическое основание, содержащее активные магнитные зоны.

По своим физико-механическим свойствам ферриты хорошо удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к подложкам ГИС СВЧ: имеют высокую меха-

ническую прочность и плотность, следовательно, их поверхность может быть обработана до 13—14-го классов шероховатости; они являются термостойкими материалами, что позволяет получать на их поверхности стабильные пленочные структуры.

Диэлектрическая проницаемость ферритов выше, чем у других диэлектрических материалов ($\epsilon=13-15$), величина тангенса диэлектрических потерь составляет $\operatorname{tg} \delta=(1-6) \cdot 10^{-3}$.

Выпускаются подложки из следующих марок ферритов: 10СЧ-6, 30СЧ-6 и другие размером 60×48 , толщиной 1 и 2 мм; выпуск подложки толщиной 0,5 мм ограничен и связан с большими технологическими трудностями.

§ 2.3. Проводящие пленки

Проводящие пленки находят различное применение в ГИС СВЧ. На основе металлических пленок, имеющих хорошую электропроводность, создаются микрополосковые линии, индуктивности, планарные конденсаторы, контактные площадки, обкладки многослойных конденсаторов.

Возможность такого применения проводящих пленок определяется следующими свойствами: малым удельным сопротивлением; хорошей адгезией с подложкой; способностью к химическому травлению, пайке или сварке; коррозионной стойкостью; близостью термического коэффициента линейного расширения и ТКЛР подложки. При выборе материала необходимо учитывать назначение проводящей пленки и условия эксплуатации схемы.

Рассмотрим, чем обусловлены требования к свойствам проводящих пленок. Для элементов ГИС СВЧ, формируемых на подложках с малым $\operatorname{tg} \delta$, доминирующее влияние на величину активных потерь оказывают потери в проводниках. Их величина зависит от удельного сопротивления материала, из которого изготовлена пленка, структуры проводящей пленки, ее однородности, плотности, внутренних напряжений в пленке, чистоты токонесущей поверхности. Большинство перечисленных факторов определяется технологическим процессом. Поэтому пригодность пленки к работе в ГИС СВЧ зависит не только от исходного конструкционного материала, но и от того, как получена проводящая пленка. Общие за-

кономерности изменения электрических свойств пленок от условий их осаждения рассмотрены в § 3.3.

При изготовлении и эксплуатации поверхность проводящих пленок может подвергаться окислению. Величина затухания в элементах ГИС СВЧ зависит от удельного сопротивления тонкого поверхностного слоя, что обусловлено поверхностным эффектом. Коррозия токонесущей поверхности ведет к появлению на ней диэлектрического Al_2O_3 , полупроводникового Cu_2O или проводящего слоя с высоким удельным сопротивлением. Если продукт коррозии — диэлектрик, то токи СВЧ текут под окисным слоем, если полупроводник или проводник, то часть тока течет в коррозионном слое, что вызывает рост активных потерь. Коррозия изменяет микрогеометрию токонесущей поверхности и ее микроструктуру, увеличивая шероховатость токонесущей поверхности. Поэтому, даже если продукт коррозии — диэлектрик, затухание растет.

Коррозионная стойкость, устойчивость параметров проводящих пленок определяются свойствами конструкционного материала, из которого она изготовлена, и зависят от структуры пленки, в первую очередь от пористости. Основой повышения стойкости пленок является уменьшение их пористости. Поры являются центрами развития коррозии. Скорость развития зависит от методов и режимов очистки.

Требования хорошей адгезии пленок с подложкой, способности к химическому травлению, пайке или сварке и отчасти согласованности ТКЛР обусловлены особенностями технологических процессов изготовления элементов ГИС СВЧ. При низкой адгезии проводящей пленки с подложкой может произойти разрушение элемента ГИС СВЧ в технологическом цикле или в процессе эксплуатации. Химическое травление является составной частью многих технологических процессов и предназначено для создания рисунка элементов ГИС СВЧ. Несогласованность ТКЛР пленки и подложки может привести к разрушению пленки при термических воздействиях или возникновению в ней внутренних напряжений, которые ведут к росту электрического сопротивления пленок. Для изготовления проводящих пленок используются различные металлы, которые делятся на несколько групп и отличаются по величине проводимости и способности к прочному сцеплению с подложкой.

Таблица 2.10

Группа	Наименование металла	Величина удельного электросопротивления относительно меди	Величина скин-слоя δ , мкм, при 2 ГГц	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$, град	Адгезия с подложкой
I	Медь	1,0	1,5	18	Очень слабая
	Серебро	0,95	1,4	21	Слабая
	Золото	1,36	1,7	15	»
	Алюминий	1,60	1,9	26	Удовлетворительная
II	Хром	7,6	4,0	9,0	Очень хорошая
	Тантал	9,1	4,4	6,6	Хорошая
	Титан	32,8	10,21	8,9	»
	Ванадий	3,2	2,66	4,6	»
III	Вольфрам	3,2	2,6	4,6	Плохая
	Молибден	3,3	2,7	6,0	»
IV	Платина	6,2	3,7	11,5	Средняя

Примечание. Величина удельного электросопротивления меди равна $1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·см.

В табл. 2.10 приведены некоторые характеристики металлов, используемых в производстве ГИС СВЧ.

Для создания проводящих пленок в основном применяются медь, серебро, золото, алюминий.

Медь является одним из наиболее распространенных металлов, который используется в производстве ГИС СВЧ. Она имеет хорошую электропроводность и способность к пайке и сварке. Недостаток меди — низкая коррозионная стойкость. Интенсивность окисления зависит от окружающей температуры: при температуре выше 200°C медь окисляется настолько быстро, что не поддается пайке. Для защиты от коррозии поверхность меди обычно покрывается тонким слоем золота или серебра.

Медные пленки легко травятся в различных травителях.

Серебро имеет высокую электропроводность. Недостатком его является способность к образованию сернистых соединений: в результате поверхностный слой серебра теряет свой белый цвет, приобретая желтоватые оттенки, а структура его становится более рыхлой. Удельное сопротивление этого слоя на 20—25% выше, чем у серебра, и его появление ведет к росту потерь на СВЧ. Атомы серебра имеют повышенную способность к миграции, т. е. перемещению в условиях повышенной влажности и высокой плотности электрического поля (электродиффузия). В результате этого может произойти короткое замыкание между проводниками микрополосковой линии или уменьшение размеров зазора, что повлечет изменение электрических параметров устройства.

Электрические характеристики серебряных пленок малокритичны и к режимам, и методам получения. Величина их удельного сопротивления стабильна и превышает удельное сопротивление «массивного» металла не более чем на 10—12% при толщине пленки более 2 мкм.

Золото имеет высокую проводимость, высокую коррозионную стойкость, хорошо поддается сварке. Золото обычно применяют в качестве проводящей пленки, когда не используется операция пайки, а также при необходимости создания хорошей защиты проводника микрополосковой линии от окисления в случае эксплуатации при высокой температуре.

Алюминий является химически активным металлом. Он легко вступает в реакцию с кислородом, образуя окисел, наличие которого на поверхности раздела «подложка — металл» приводит к улучшению адгезии с подложкой. Слой окисла на наружной поверхности алюминия служит защитой от дальнейшего окисления. Адгезия алюминия с подложкой увеличивается с ростом температуры. Однако при высокой температуре (300—400°С) алюминий образует большие гранулы и пористую структуру.

Алюминий плохо поддается пайке. Сварка пленки алюминия с выводами навесных элементов обычно производится с использованием ультразвука. Для обкладок пленочных конденсаторов в основном используют алюминий. Недостатком пленки алюминия является малая твердость — пленки могут быть легко повреждены при механических воздействиях.

Толщина основных проводящих элементов ГИС СВЧ — микрополосковых линий и индуктивностей — ограничена наименьшими и наибольшими размерами. Минимальная толщина обусловлена допустимыми электрическими потерями. На рис. 2.13 показана зависимость

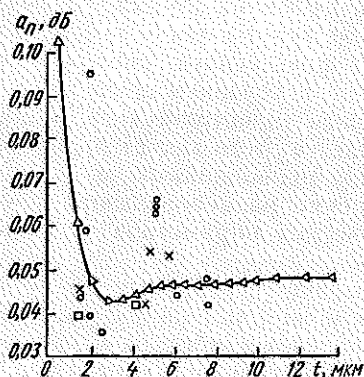


Рис. 2.13. Зависимость потерь $\operatorname{tg} \delta$ микрополосковой линии от толщины тонкопленочного покрытия

активных потерь в микрополосковой линии от толщины токонесущего покрытия.

Проводники ГИС СВЧ могут состоять из одного, двух и более слоев различных металлов.

Для однослойных структур наиболее подходящим металлом является алюминий, который применяют в схемах СВЧ, содержащих пленочные конденсаторы.

Применение для проводников металлов первой группы (Ag, Cu, Au), имеющих слабую адгезию

с подложкой, вызывает необходимость введения дополнительного слоя — адгезионного подслоя. Если проводящий слой неустойчив к воздействию окружающей среды, то вводится внешний третий слой, играющий роль защитного; он является и токонесущим слоем.

В качестве адгезионного подслоя можно использовать хромовые, никромовые, титановые или ванадиевые пленки. Эти металлы имеют различную адгезию с подложкой. Далее приведены показатели адгезии, характеризующие усилие отрыва пленки от поверхности подложки для различных металлов.

Металл	Величина относительного усилия отрыва
Хром	1,0
Нихром	0,72
Ванадий	0,70
Титан	0,48
Алюминий	0,44
Усилие отрыва пленки хрома . . .	2,7 кгс/мм ²

Выбор металла для подслоя связан с принятой технологией изготовления пленочной структуры и определяет прочность сцепления металлической пленки с подложкой. На рис. 2.14 представлена зависимость прочности сцепления медной пленкой с подложкой из керамики А-995 от толщины молибденовых и хромовых подслоев. С увеличением толщины подслоя прочность сцепления слоя увеличивается. Однако для облегчения процесса фотолитографии толщина подслоя создается равной 200—300 Å. При этом обеспечивается прочность сцепления около 1 кг/мм².

Хром имеет лучшую адгезию с подложкой по сравнению с нихромом, однако резисторы из хрома имеют более высокий температурный коэффициент сопротивления и худшую стабильность. Поэтому в схемах, имеющих пленочные резисторы с удельным поверхностным сопротивлением до 300 Ом, в качестве подслоя целесообразно использовать нихром.

Основу микрополосковой линии составляет металл с хорошей проводимостью: медь или золото. В системе «хром—золото» при повышенных температурах происходит диффузия хрома в золото, что приводит к значительному увеличению сопротивления. Для того чтобы избежать этого явления, можно вместо хрома использовать титан. Несмотря на положительные свойства золота, его использование в качестве основного проводящего слоя микрополосковой линии является экономически невыгодным. Поэтому чаще используют для этой цели медь. Пленки меди, напыленные непосредственно на подложку из Al_2O_3 , имеют слабую адгезию. Прочность сцепления в этом случае не превышает 0,05 кгс/мм² с полированной и 0,1 кгс/мм² со шлифованной поверхности подложек. Для повышения прочности сцепления медных пленок с подложкой используется подслой из хрома или нихрома. При выборе толщины подслоя необходимо учи-

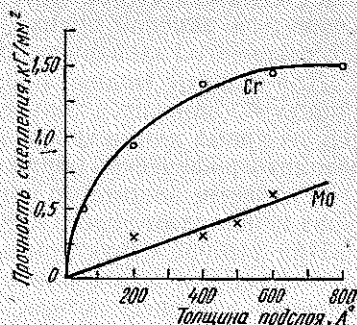


Рис. 2.14. Зависимость прочности сцепления медных пленок с керамической подложкой

тывать, что сопротивление высокоомной адгезионной пленки будет вызывать рост активных потерь в микрополосковых проводниках (см. § 5.1). В процессе изготовления и эксплуатации происходит взаимная диффузия в системе «хром—медь», однако заметного изменения электрического сопротивления слоев это не вызывает.

Медный слой состоит из двух слоев: тонкого (около 1 мкм), осажденного в вакууме, и толстого (до 8—10 мкм), полученного путем гальванического наращивания. После осаждения меди в вакууме на ней может образоваться окисная пленка, затрудняющая получение качественного гальванического покрытия.

Для защиты медной пленки на нее, непосредственно в вакууме, наносится тонкое защитное покрытие, например, из хрома или нихрома, которое в процессе операции фотолитографической обработки удаляется.

В качестве защитного покрытия в трехслойных структурах используют золото или серебро.

При выборе структуры микрополоскового проводника следует учитывать влияние адгезионного подслоя на величину активных потерь. Так как токи СВЧ текут в тонком поверхностном слое проводника, это влияние значительно заметнее, чем в низкочастотных схемах. На рис. 2.15, 2.16 показаны зависимости, характеризующие

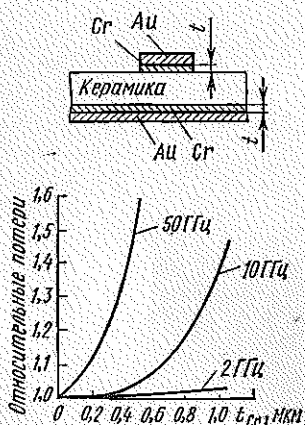


Рис. 2.15. График потерь в микрополосковой линии системы «хром — золото»

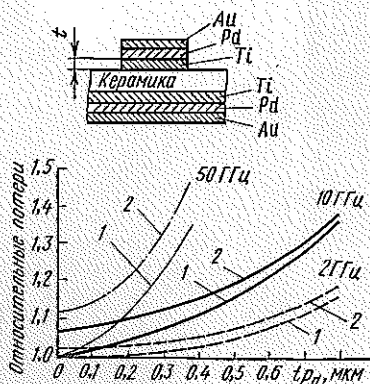


Рис. 2.16. График потерь в микрополосковой линии системы «титан — палладий — золото»:

1 — толщина слоя Ti 0 мкм; 2 — 0,1 мкм

влияние адгезионного подслоя на затухание в микрополосковых линиях на основе двухслойной системы «хром—золото» и трехслойной «титан—палладий—золото». Вещественная часть поверхностного сопротивления двухслойной токонесущей поверхности (рис. 2.17) определяется выражением

$$\rho_s = \rho_1 \frac{(1 + \rho_2/\rho_1)^2 \exp(4t/d) + 2[(\rho_2/\rho_1)^2 - 1] \sin 2t/d \exp 2t/d - (1 + \rho_2/\rho_1)^2 \exp(4t/d) - 2[(\rho_2/\rho_1)^2 - 1] \times - (\rho_2/\rho_1 - 1)^2}{\times \cos 2t/d \exp 2t/d + (\rho_2/\rho_1 - 1)^2}, \quad (2.14)$$

где ρ_1 — удельное сопротивление адгезионной пленки; ρ_2 — удельное сопротивление материала проводника; t — толщина адгезионной пленки металла; d — глубина скин-слоя для материала поверхностной пленки.

Величина потерь в микрополосковой линии, рассчитанная для ρ_s , будет учитывать влияние адгезионной пленки.

Структура и используемые материалы для контактных площадок пленочных схем СВЧ практически аналогичны микрополосковым линиям.

Обязательное требование к верхнему слою состоит в необходимости обеспечения возможности присоединения выводов навесных элементов или проводника СВЧ-разъема.

Для сварки верхнего покрытия могут служить серебро, золото или никель. Когда же присоединение осуществляется пайкой, место контакта необходимо облудить, используя соответствующий припой, исключающий растворение металла верхнего покрытия.

Толсто пленочные проводящие пленки наносятся методом трафаретной печати с использованием специальных паст, представляющих собой смесь мелкоизмельчен-

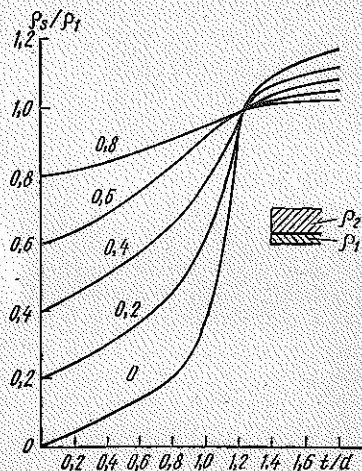


Рис. 2.17. Зависимость поверхностного сопротивления двухслойной структуры от соотношения t/d

ных порошков благородных металлов или окислов, стеклянной фритты*, органического наполнителя и растворителя. Иногда в пасты добавляют флюсы.

Металлические порошки, выполняя роль функционального элемента**, обеспечивают создание определенных проводящих или резистивных свойств. Размер частиц порошков обычно не превышает 5 мкм. Стеклянная фритта удерживает частицы функциональных элементов, обеспечивая их сцепление друг с другом и с подложкой. Поверхностное натяжение стекла и смачивание им металлических частиц определяют механические свойства и стабильность контактов между частицами металла.

Органические наполнители и растворители придают смеси определенную вязкость и жидкотекучесть, выполняя роль временного связующего. Органические добавки содержат большое количество углерода, поэтому одним из основных требований, предъявляемых к органическим наполнителям, является полное выгорание в процессе отжига до момента достижения максимальной температуры.

Другими требованиями являются: инертность к металлам и окислам, хорошее смачивание подложки и порошкообразных компонентов пасты, малая зависимость вязкости от окружающей температуры.

В качестве органических добавок применяются: спирты (метиловый, этиловый); их эфиры, ланолин, парафин; вазелин: воск и др. Смешивают связующее с компонентами пасты протиранием через сито или по лаковой технологии. Флюсы используют для изменения свойств пасты, улучшения смачивания подложки и вводят в фритту на этапе ее приготовления.

Основу проводящих паст составляют порошки благородных металлов: серебра, золота, платины или палладия. Благородные металлы выбирают благодаря их химической инертности и хорошей электропроводности. Сопротивление вожженной проводящей пасты составляет от 0,1 до 0,01 Ом/кв. При нанесении припоя эта величина уменьшается примерно в 8—10 раз.

* Фритта — порошок стекла с размером частиц 10—30 мкм, полученный быстрым охлаждением расплавленного стекла в воде.

** Функциональный элемент — вещество, входящее в состав пасты и придающее ей определенные свойства: проводящие, резистивные или диэлектрические.

Проводящие составы могут быть одноэлементными на основе серебра, золота, палладия и т. д. или многоэлементными на основе платины — золота; платины — палладия — золота и др. Типичные вещества, используемые для получения проводящего состава, следующие: хлористый палладий, серебро азотнокислородное, стекло и окись висмута.

Структура пленок, полученных по толстопленочной технологии, относительно пористая. Используя их, сложно получить ровные кромки проводников, а неровные края и непрямоугольное поперечное сечение ведут к росту активных потерь и отклонению волнового сопротивления от расчетной величины.

Толстопленочные микрополосковые линии характеризуются несколько большими потерями, чем тонкопленочные той же толщины, а наименьшая ширина линий составляет около 0,25 мм.

Сравнительные потери в тонко- и толстопленочном проводниках приведены на рис. 2.18. Основные виды и характеристики металлических систем, используемые в производстве ГИС СВЧ, приведены в табл. 2.11.

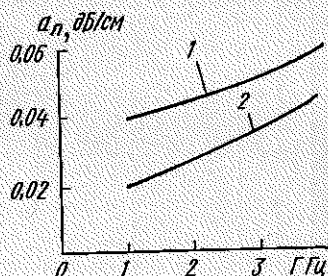


Рис. 2.18. Зависимость потерь от частоты:

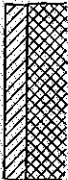
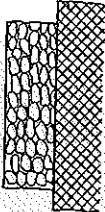
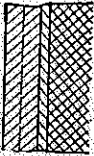
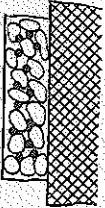
1 — толстопленочного проводника на основе золота толщиной 12 мкм; 2 — тонкопленочного проводника системы «хром—медь—золото» толщиной 8 мкм

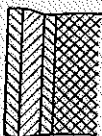
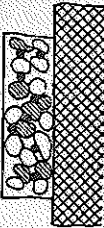
§ 2.4. Резистивные пленки

Резистивные материалы в ГИС СВЧ применяются в качестве резистивного слоя резисторов и адгезионного подслоя сложных многослойных структур. Кроме того, тонкие пленки тугоплавких металлов используются как барьерные слои, предотвращающие взаимную диффузию металлов.

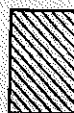
Основные требования, которые предъявляются к резистивным материалам, следующие: величина удельного сопротивления 50—1000 Ом/кв; высокая стабильность; малая величина температурного коэффициента сопротивления, способность к образованию однородной структуры, способность к химическому травлению, хорошая

Таблица 2.11

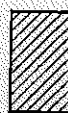
Тип структуры	Технология		Рекомендуемый металл	Толщина слоев, мкм	
	тонкопленочная	толстопленочная		подслоя	основного защитного
Однослойные			Алюминий	—	4—5
Одноэлементные			Серебро, золото, палладий	—	10—20
Двухслойные	 		Хром — золото	0,01—0,03 4	—
Двухэлементные			Титан — золото Платина — золото	—	10—20

Трехслойные	 	Хром (нихром, ванадий) — медь — золото (серебро)	0,01—0,03	3—11	1,0
Трехэлементные		Титан — палладий (платина) — золото Платина — палладий — золото	—	10—20	—

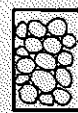
Примечание.



— вакуумно-осажденные металлы;



— гальванически осажденные металлы;



— паста.

адгезия с подложкой. Резистивные материалы, используемые в качестве адгезионного подслоя, в основном должны удовлетворять двум последним требованиям.

Для резистивного слоя используют хром, нихром, резистивные сплавы, нитрид тантала, металлокерамические смеси и т. д.; для адгезионного подслоя — хром, нихром, ванадий, тантал; для барьерного слоя многослойных структур — никель, титан и для защитного покрытия — никель.

Одним из важных свойств материала, используемого в качестве резисторов ГИС СВЧ, является способность к образованию однородной структуры. Это имеет большое значение для оценки высокочастотных характеристик резисторов, так как с повышением частоты за счет возникновения межкаристаллической и распределенной емкости и индуктивности изменяется его эффективное сопротивление по сравнению с величиной сопротивления на низких частотах.

Материалы, используемые для получения резистивных пленок, можно разделить на четыре группы: 1) чистые металлы, или монометаллы; 2) сплавы; 3) керметы; 4) соединения.

Свойства тонкопленочных резисторов во многом определяются технологическими факторами, т. е. условиями получения пленки. Практически для каждого мате-

Таблица 2.12

Группа материала	Наименование материала	Удельное поверхностное сопротивление, Ом/кв	Способ нанесения
Чистые металлы Монометаллы Сплавы	Хром	50—500	Термическое испарение
	Тантал	25—100	Ионно-плазменное распыление
	Нихром	100—250	Термическое испарение
	Кремниевые	50—2000	Взрывное испарение, термическое испарение
Керметы	Хром-моноксид кремния	До 20000	Взрывное испарение
Соединения	Нитрид тантала	20—100	Ионно-плазменное распыление в атмосфере азота

риала необходимо подбирать оптимальные условия изготовления пленок.

В табл. 2.12 приведены основные виды материалов, используемых для изготовления резисторов пленочных ГИС СВЧ.

Чистые металлы. Чистые металлы по сравнению с другими резистивными материалами имеют небольшую величину удельного поверхностного сопротивления. В этом случае при получении больших величин сопротивлений резисторов требуется нанести тонкий (несколько десятков ангстрем) слой металла. Стабильность и воспроизводимость таких пленок недостаточны.

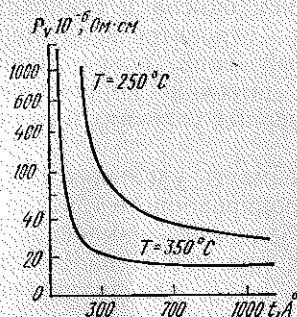


Рис. 2.19. Зависимость удельного сопротивления пленок хрома от толщины и температуры подложки

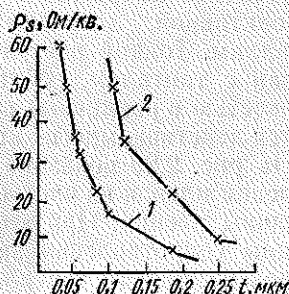


Рис. 2.20. Зависимость удельного поверхностного сопротивления тантала от толщины пленки:

1 — чистого; 2 — анодированного

Среди чистых металлов наибольшее применение имеют хром и тантал. Пленки хрома имеют высокую адгезию с поверхностью подложек, что дает возможность использовать его одновременно и в качестве адгезионного подслоя.

Отличительной особенностью хрома является большая разница величин удельного сопротивления в монолитном состоянии и в пленке. На рис. 2.19 показана зависимость удельного поверхностного сопротивления хромовых резистивных пленок от их толщины при различных температурах, которые имела подложка в процессе формирования пленки.

Особенностью хрома является трудность получения

заданных параметров пленки из-за сильной зависимости свойств от условий технологического процесса.

Так как хром имеет недостаточно высокое удельное сопротивление, его чаще используют в качестве составляющей различных сплавов и смесей.

Танталовые пленки являются основой для создания резисторов с большим удельным поверхностным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления и диэлектрических слоев конденсаторов. Тантал является тугоплавким материалом (температура испарения около 3000°C). Пленки тантала стабильны и хорошо противостоят коррозии, поскольку его поверхность легко покрывается пленкой окисла и становится малоактивной, хотя сам тантал относится к активным металлам. Тонкий поверхностный слой окиси хорошо связан с танталом, обладает высокой коррозионной стойкостью в различных атмосферных условиях и не поддается действию многих кислот.

На рис. 2.20 показана зависимость удельного сопротивления пленок из чистого и анодированного тантала от толщины пленки. При этом наблюдалось изменение величины сопротивления за 24 ч при 290°C на 2% для пленок из чистого тантала и на 0,17% для анодированного.

Величина удельного сопротивления танталовых пленок в зависимости от технологии изготовления меняется в широких пределах $(4-600) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Величина ТКР пленок составляет $\pm 1 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$; допустимая мощность рассеяния 2 Вт/см^2 ; стабильность: 0,5% изменения сопротивления за 1000 ч работы в нормальных условиях.

К сплавам относятся нихром и кремниевые сплавы. *Нихром* — материал, широко используемый в производстве резисторов. Обычно для получения резистивных пленок используют сплав с соотношением никеля и хрома 80:20 (4:1). Добавление никеля к хрому увеличивает удельное сопротивление и снижает величину температурного коэффициента сопротивления чистого хрома. Электрические свойства пленок нихрома зависят от способа получения и параметров процесса. Наиболее однородные и стабильные пленки нихрома получают при осаждении на подложку при температуре $350-400^{\circ}\text{C}$. Изменение сопротивления таких пленок при испытании в условиях повышенной влажности (98%) и тем-

температуры ($+40^{\circ}\text{C}$) в течение 30 сут составляет менее 1%.

Величина температурного коэффициента сопротивления пленок нихрома зависит от состава и величины удельного поверхностного сопротивления. Для стандартного состава сплава (80% — никеля и 20% хрома сопротивлением 50—100 Ом/кв) величина TKR составляет $(1-2) \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$.

Трудностью при испарении нихрома является фракционирование сплава из-за различных парциальных давлений компонентов, что нарушает стехиометрический состав пленки.

Результаты многочисленных исследований показали, что в нормальных условиях в испаренных пленках нихрома с течением времени происходят следующие процессы: окисление резистивного слоя; заживление и упорядочение дефектов и снятие напряжений; рекристаллизация и рост зерна.

Окисление ведет к увеличению сопротивления, в то время как другие процессы обуславливают его уменьшение. Временной дрейф сопротивления нихромовых пленок обычно имеет положительное направление, что свидетельствует о доминирующей роли окисления и слабом влиянии рекристаллизации. Скорость изменения сопротивления зависит от температуры — с ее ростом она увеличивается.

Существуют способы, позволяющие замедлить окисление и ускорить рекристаллизацию в пленках нихрома. Например, добавки редкоземельных элементов препятствуют диффузии кислорода по границам зерен, что способствует повышению плотности и непроницаемости поверхностного окисла. Добавки алюминия усиливают роль рекристаллизации. Так как температура рекристаллизации алюминия ($\sim 150^{\circ}\text{C}$) ниже, чем нихрома ($400-500^{\circ}\text{C}$), добавка алюминия ведет к снижению температуры рекристаллизации сплава. В результате при правильном выборе соотношений компонентов возможно получение резисторов с TKR , близким к нулю. Так, резисторы, полученные испарением, состоящие из нихрома с добавкой 1—2% Al, обладают дрейфом 0,05% в течение 1000 ч при температуре 125°C и имеют $\text{TKR} = -15 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Кремниевые сплавы МЛТ и МЛТ—ЗМ являются многокомпонентными сплавами и содержат: хром—крем-

ний—железо—вольфрам. Наличие такого числа компонентов приводит к зависимости свойств от состава пленки. Сложность воспроизведения химического состава в пленках связана с различной скоростью испарения их компонент. Резисторы из сплава МЛТ имеют величину температурного коэффициента сопротивления от $-1 \cdot 10^{-4}$ до $+1 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$ в зависимости от температуры подложки и температуры испарителя.

Характеристики стабильности пленочных резисторов из сплава МЛТ—ЗМ следующие: изменение величины сопротивления при воздействии 5 циклов изменения температуры от -65 до $+20^\circ\text{C}$ в пределах 0,2%, а при длительном воздействии тепла ($+85^\circ\text{C}$) и нагрузки (1 Вт/см^2) в течение 1000 ч — не более 1%.

Частотная зависимость сопротивления пленок сплава МЛТ—ЗМ с величиной сопротивления на постоянном токе 350—500 Ом/кв в диапазоне до 220 МГц свидетельствует об уменьшении эффективного сопротивления на 20—60% для пленок различного номинального значения сопротивления.

К керметам, получившим наибольшее применение, относятся *хром-моноокись кремния*.

Пленки керметов представляют собой совокупность металлов и диэлектриков и состоят из двух твердых фаз, одна из которых — диэлектрик, увеличивает удельное сопротивление, обволакивая частицы металла. Пленки кермета хром-моноокись кремния имеют высокие электрические и эксплуатационные свойства.

Величина удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления и характеристики стабильности зависят от состава порошка кермета и условий формирования пленки.

С увеличением содержания монооксида кремния в составе пленки от 10 до 60% величина удельного сопротивления меняется от 10^{-3} до 10^2 Ом·см.

Величина температурного коэффициента сопротивления от -60°C до $+145^\circ\text{C}$ керметовых пленок системы «хром—моноокись кремния» изменяется в пределах $\pm 140 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ в зависимости от состава и удельного поверхностного сопротивления.

Керметовые резисторы имеют незначительное изменение сопротивления при испытаниях под нагрузкой 0,125 Вт и повышенной температуре 125°C ; за 2000 ч работы изменение сопротивления составляет менее 2%.

Нанесение пленок на горячие подложки и продолжительный отжиг на воздухе необходимы для завершения реакций образования силицидов в пленках и кристаллизации. Обычно пленки Cr—SiO состоят из кристаллитов металлического хрома и его силицидов, диспергированных в аморфной матрице двуокиси кремния. С течением времени возможны окончательное формирование и преобразование фаз и рекристаллизация, но эти процессы в отожженных пленках должны быть незначительными. Кроме того, возможно поверхностное и объемное окисление хрома. Скорость этого процесса будет зависеть от содержания хрома в резистивном слое.

Резистивными пленками, представляющими собой соединения, являются пленки *нитрида тантала*. Резисторы на основе нитрида тантала имеют хорошие электрические и эксплуатационные характеристики. При испытаниях под нагрузкой $0,5 \text{ Вт/см}^2$ в течение 170 ч изменение сопротивления составило менее 0,1%; после испытаний за это же время при 100% относительной влажности и температуре 70°C сопротивление изменилось менее чем на 0,5%. В результате измерений резисторов с удельным поверхностным сопротивлением 100—700 Ом/кв на частотах до 1,5 ГГц обнаружены минимальные паразитные эффекты: индуктивность около 3 нГн, а емкость в пределах 0,08—0,5 пФ.

В качестве резистивных материалов толстопленочных схем применяют резистивные композиции, позволяющие создавать пленки с удельным поверхностным сопротивлением 20—5000 Ом/кв.

Резистивные пасты содержат те же металлы, которые используют для приготовления проводящих паст, только в другом процентном отношении: уменьшается доля металлических частиц и увеличивается доля фритты. Так, проводящая паста на основе «палладия—серебра» содержит: Pd—55%; Ag—30%, фритты—15%; резистивная—Pd—4—15%; Ag—12%, фритты—84—73%.

Функциональным элементом резистивных паст могут быть окислы металлов: палладия, таллия, рутения. Для получения хороших температурных характеристик, низкого уровня шумов и высокой стабильности во времени используют составы на основе «палладий—серебро» или «платина—окись таллия». Для изготовления паст применяются хлористый палладий, азотнокислое серебро и боросвинцовосиликатное стекло.

Величина температурного коэффициента сопротивления толсто пленочных резисторов изменяется в зависимости от состава паст от 8 до $-12 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$. Незащищенные резисторы меняют сопротивление после испытаний на влагоустойчивость (98% относительная влажность, 40° С в течение 30 сут) в пределах $\pm 5\%$.

Изменение сопротивления после испытаний на термоциклирование (5 циклов при $-60 \div +85^\circ \text{C}$) составляет $\pm 2,5\%$.

§ 2.5. Диэлектрические пленки

В ГИС СВЧ диэлектрические пленки находят применение для изготовления СВЧ-конденсаторов.

Пригодность диэлектрического материала для изготовления конденсаторных структур ГИС СВЧ определяется возможностью получения заданных электрических и эксплуатационных характеристик. Поэтому при выборе диэлектрика и методов получения диэлектрической пленки необходимо учитывать следующие требования: высокую воспроизводимость свойств; низкие диэлектрические потери на СВЧ; высокую пробивную прочность; высокую диэлектрическую проницаемость, хорошую температурную стабильность и химическую стойкость при эксплуатации; минимальную гигроскопичность; ТКЛР, близкий к ТКЛР подложки и металлических пленок, и др.

Выбор материала пленки определяется также возможностью контроля характеристики пленок в процессе получения, что связано с трудностью подстройки конденсаторов после изготовления. Желательно, чтобы температура испарения диэлектрика была 1000—1800° С, так как более низкая температура свидетельствует о высокой подвижности атомов, что может стать причиной отказа конденсатора, а при более высоких температурах испарения возникают трудности создания испарителей.

Сквозная пористость диэлектрической пленки приводит к возникновению в конденсаторных структурах коротких замыканий и пробоев. Скорость диффузии атомов металла по поверхности намного больше, чем в объеме диэлектрика, поэтому наиболее вероятным местом образования «мостиков проводимости» является пора. Сорбция влаги и газов иногда приводит к увеличению проводимости, что может явиться источником теплового про-

боя, а при высоких напряженностях электрического поля электрическая прочность конденсаторов будет ограничена возможностью пробоя газа в порах. Появление механических напряжений в диэлектрических слоях обуславливается как технологическими условиями формирования, так и отличием ТКЛР пленки, подложки и проводниковых пленок. Большие механические напряжения в пленках с течением времени приводят к неоднородности состава, растрескиванию, шелушению. Практика показала, что указанным требованиям удовлетворяет ограниченное число материалов.

В табл. 2.13 даны характеристики диэлектрических материалов, применяемых при изготовлении ГИС СВЧ.

Наиболее широко используются пленки монооксида кремния SiO_2 , которая сублимируется при температуре $1100\text{--}1300^\circ\text{C}$. На свойства получаемых пленок SiO_2 сильно влияют технологические условия получения. Плохая воспроизводимость характеристик пленок SiO_2 объясняется наличием в них таких соединений кремния, как SiO_2 , Si_2O_3 , имеющих различные электрофизические характеристики.

Контроль качества пленок позволяет получать конденсаторы с удельной емкостью до 10^4 пФ/см² с удовлетворительными электрофизическими характеристиками. Однако остается достаточно высокой вероятность спонтанного появления коротких замыканий, особенно в условиях повышенной влажности (интенсивность отказов порядка 10^{-5} ч⁻¹). Пленки SiO_2 в отличие от пленок SiO имеют меньшее значение диэлектрической проницаемости и более высокую электрическую прочность. Добротность конденсаторов достигает $10^2\text{--}10^3$. Недостатком SiO_2 является высокая температура испарения ($\sim 1700^\circ\text{C}$).

Пленки SiO_2 в основном используются для получения конденсаторов, работающих при повышенных температурах.

На практике часто применяют пленки Al_2O_3 и Ta_2O_5 , получаемые анодированием пленок Al и Ta . Преимуществом пленок Ta_2O_5 являются их высокая диэлектрическая проницаемость ($\epsilon \approx 25$) и возможность получения больших удельных емкостей ($0,1\text{--}0,2$ мкФ/см²). Однако частотный диапазон этих элементов невелик ($0,1\text{--}1,0$ МГц) вследствие высокого сопротивления нижней танталовой обкладки. Особенностью применения пленок

Таблица 2.13

Наименование материала	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ (при $\lambda/\lambda_{\text{кпд}}$)	Половина нап. $E_{\text{пр.х}}$ $\times 10^{-6}$, В. см ⁻¹	Температурный коэффициент емкости α , 10^4 град ⁻¹	Толщина t , мкм	Добротность в СВЧ-диапазоне	Материал обкладки	Метод получения пленки
SiO SiO ₂	5—6 4	0,01—0,03 0,001—0,04	1—3 3	2—4 0,3—1	0,3—4,0 0,08—1,0	30 10^3 — 10^5	Алюминий »	Термическое ВЧ-испарение. Плазменное пиролизное выращивание Термическое окисление Реактивное распыление
Ta ₂ O ₅	22—25	0,01—0,5	1—3	2,5—3,5	0,05—0,25	10^3	антал	Электродитическое окисление Плазменное анодирование
Al ₂ O ₃	8—9	0,002—0,01	6—9	2—3	0,04—0,3	—	Алюминий	Электродитическое окисление Реактивное распыление
Боросиликатное стекло	4	0,0007— 0,002 (10^2 — 10^3 Гц)	2—5	0,3—0,35	0,2—2,0	—	Алюминий	Термическое испарение
Алюмосиликатное стекло	7—7,5	0,002—0,003	2,5—4,0	0,1—0,2	0,2—1,0	—	»	То же

Ta_2O_5 в ГИС СВЧ является трудность совмещения вакуумно-термического метода получения резистивных и проводящих элементов с электрохимическим методом получения диэлектрической пленки Ta_2O_5 .

Для обеспечения высокой адгезии верхней обкладки конденсатора к Ta_2O_5 применяют двухслойные системы $Cr-Au$, $Cr-Al$.

Простоту нанесения пленок Al и процесса анодирования используют при получении конденсаторов с диэлектриком Al_2O_3 . Несмотря на небольшую величину относительной диэлектрической проницаемости ($\epsilon=8-9$), пленки Al_2O_3 имеют высокую воспроизводимость и стабильность. В этом случае проводники, обкладки конденсаторов и диэлектрические пленки изготавливают обычно на основе одного и того же материала (Al).

Система $Al-Al_2O_3$ отличается термодинамической устойчивостью во времени и малокритична к технологическим факторам при анодировании.

В последнее время широко распространены диэлектрические пленки на основе оксидных стекол (боросиликатные, алюмосиликатные и др.). Они наиболее полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу диэлектрических пленок. При этом повышается вероятность формирования беспористой диэлектрической пленки, допускается термоотжиг механических напряжений (рис. 2.21), залечивание дефектов пленки при электротренировке изготовленных конденсаторов. Путем подбора исходного состава стекол можно в широких пределах и плавно изменять их электрические, механические и тепловые характеристики. Так, электрическая прочность большинства известных стекол выше 10^6 В/см, относительная электрическая проницаемость составляет 4—8, тангенс угла диэлектрических потерь составляет $(0,7-3) \cdot 10^{-3}$, $TKLP = (50 \div +200) \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Для получения диэлектрических пленок толсто пленочных микросхем используют диэлек-

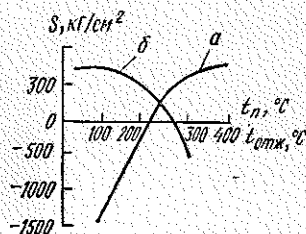


Рис. 2.21. Изменение внутренних напряжений в пленках титаносиликатосвинцовистых стекол от:

a — температуры отжига; b — температуры подложки при осаждении

трические пасты, в состав которых входят титанат бария или стронция, стекло и частицы стеклокерамики. По толсто пленочной технологии изготавливают конденсаторы, работающие на частотах до 1 ГГц и в схемах, для которых требования к точности изготовления и электрическим характеристикам невысокие.

При толщине пленки диэлектрика 25—30 мкм можно получить конденсаторы емкостью 1—1000 пФ, выдерживающие пробивное напряжение 150 В и имеющие величину $\operatorname{tg} \delta$, равную 0,02.

Использование пленочных конденсаторов в СВЧ-схемах ограничено большим числом дефектов, влияющих на выход годных элементов и стабильность электрических характеристик. Поэтому часто при разработке ГИС СВЧ применяют навесные конденсаторы.

§ 2.6. Корпуса ГИС СВЧ

Корпус занимает важное место в обеспечении электрических и эксплуатационных характеристик ГИС СВЧ.

Корпус любой ГИС СВЧ должен удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать механическую, климатическую, электромагнитную защиту элементов схемы от внешних воздействий и отвод тепла, которое выделяется при работе схемы; иметь определенные точностные характеристики наружных и внутренних размеров и определенную шероховатость поверхностей, взаимодействующие с электромагнитным полем; материал корпуса должен иметь близкий ТКЛР к ТКЛР материала подложек ГИС СВЧ, а также минимальный удельный вес.

Требование обеспечения механической прочности к ударам и вибрациям удовлетворяется надлежащим выбором материала корпуса и его конструкции.

Защита от климатических воздействий обеспечивается соответствующей герметизацией корпуса, который является базовым соединительным элементом. Поэтому его внутренние размеры, особенно для многоплатных ГИС СВЧ, должны быть выполнены таким образом, чтобы обеспечить соразмерную установку плат в корпус, соединение их между собой и с внешними выводами.

Требование минимальной шероховатости поверхностей корпуса, взаимодействующих с электромагнитным полем, обусловлено необходимостью снижения потерь

СВЧ-энергии. Высота микронеровностей зависит от физических свойств материала корпуса, качества обрабатывающего инструмента и технологии обработки.

Критерием для выбора необходимого класса шероховатости $N_{\text{ш}}$ металлической токонесущей поверхности конструкции, работающей в СВЧ-диапазоне, является следующее неравенство:

$$N_{\text{ш}} \geq \ln^2 \frac{30}{d}, \quad (2.15)$$

где d — глубина скин-слоя, мкм.

На рис. 2.22 приведена рассчитанная из неравенства (2.15) зависимость требуемого класса шероховатости токонесущей поверхности $N_{\text{ш}}$ в функции рабочей длины волны λ_0 .

Близость ТКЛР материала корпуса и подложек ГИС СВЧ обусловлена необходимостью обеспечения работоспособности изделия при пониженных, повышенных и знакопеременных температурах. Особенно это требование важно, когда платы ГИС СВЧ прикрепляются к основанию корпуса методом пайки или приклеиванием. Материал корпуса должен быть также недефицитным и технологичным для применения в серийном производстве.

В табл. 2.14 приведены характеристики основных материалов, используемых для изготовления ГИС СВЧ.

Из приведенных в табл. 2.7 и 2.14 данных видно, что материалами корпуса и подложек с наиболее близкими температурными коэффициентами линейного расширения являются: ковар и ситаллы, титановые сплавы и поликор.

Кроме различия температурных коэффициентов линейного расширения материалов подложек и корпуса, создающего при изменении температуры определенное

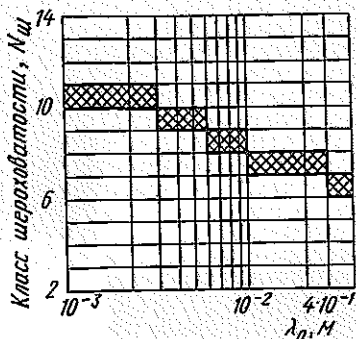


Рис. 2.22. Зависимость между классом шероховатости токонесущей поверхности $N_{\text{ш}}$ и рабочей длиной волны λ_0 (при коэффициенте увеличения активных потерь $k_1=1,1$)

Таблица 2.14

Наименование материала	Марка	Удельный вес, г/см ³	Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha_t \times 10^{-6}$, град ⁻¹	Покрытие
Титановые сплавы	BT1-0 BT6-1 OT4-0	4,5 4,42 4,51	84,4 83,0 80,0	Золото, серебро
Ковар	29HK	8,2	44—52	Золото
Прессматериал	АГ-4В	1,9	100—150	Медь — олово — висмут
Дюралюминий	АД-16	2,6—2,8	219—226	Никель — медь—золото; никель — медь — олово — висмут

напряжение, необходимо также учитывать и характер этого напряжения. Так как у большинства диэлектриков, используемых в качестве материала платы, механическая прочность на сжатие выше, чем при растяжении, желательно выбрать такой материал корпуса, чтобы при температурных изменениях в плате возникло напряжение сжатия.

Глава 3

ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА ГИС СВЧ

В основе получения пленочных элементов ГИС СВЧ лежат процессы превращения исходных веществ в тонкие слои — пленки и создания в них определенных конфигураций.

Для нанесения пленок в тонкопленочной технологии используют вакуумные способы: термическое испарение, распыление и ионно-термическое испарение, а также электрохимическое осаждение. Для получения конфигураций пленочных элементов используют фотолитографическую обработку и селективное травление.

Основным процессом нанесения пленок в толстопленочной технологии является трафаретная печать.

Неотъемлемой частью технологического процесса получения как тонких, так и толстых пленок является термическая обработка.

§ 3.1. Процессы получения пленочных элементов

Существует несколько способов нанесения пленок.

Вакуумные способы. Свойства тонких пленок, осаждаемых в вакууме, зависят от выбранного способа нанесения, используемого оборудования и параметров процесса.

Независимо от способа получения и осаждения слоя, исходное вещество, из которого формируют пленочные элементы, проходит ряд превращений, связанных с изменением агрегатного состояния. В основе этих изменений лежат физические явления: испарение, перенос и конденсация частиц вещества. Уменьшение остаточного давления в камере позволяет улучшить качество осаждаемого слоя и повысить экономичность процесса.

На рис. 3.1 приведена номограмма, которая позволяет определить основные характеристики остаточной ат-

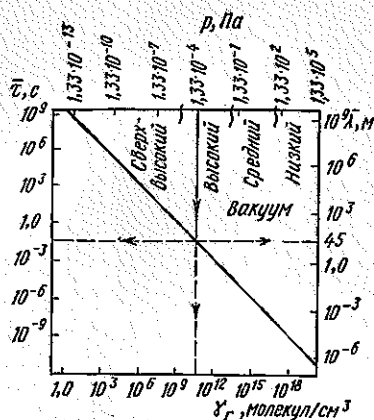


Рис. 3.1. Номограмма определения показателей характеристик газа в камере в зависимости от величины остаточного давления

мосферы: плотность газа (γ_r), среднюю длину свободного пути молекул атомов ($\bar{\lambda}$), среднюю величину времени между столкновением молекул газа о поверхность подложки ($\bar{\tau}$) от величины остаточного давления (p) в камере.

Схемы явлений, происходящих в камере при использовании вакуумных способов нанесения пленок, приведены на рис. 3.2.

Термическое испарение представляет собой процесс перехода вещества из твердого состояния

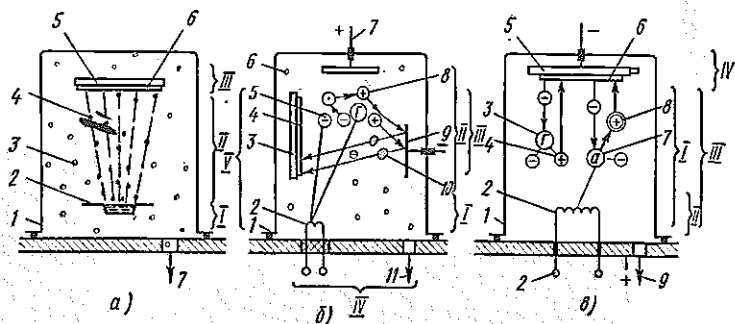


Рис. 3.2. Схема явлений, происходящих в вакуумной камере:

а — при термическом испарении материалов в вакууме: 1 — вакуумная камера; 2 — испаритель с испаряемым веществом; 3 — молекула остаточного газа; 4 — частица испаренного вещества; 5 — подложка; 6 — пленка; 7 — откачные средства; 1 — испарение; II — переход от испарителя до подложки; III — конденсация; б — при ионном распылении: 1 — вакуумная камера; 2 — источник остаточного газа; 3 — подложка; 4 — осажденная пленка; 5 — электрон; 6 — молекула остаточного газа; 7 — анод; 8 — положительно заряженный ион газа; 9 — мишень; 10 — частица распыленного вещества; 11 — откачные средства; 1 — термоэмиссия электронов; II — ионизация; III — распыление; IV — переход вещества от мишени к подложке; V — конденсация; в — при ионно-термическом испарении: 1 — вакуумная камера; 2 — испаритель (анод); 3 — молекула инертного газа; 4 — ион газа; 5 — подложка (катод); 6 — осажденная пленка; 7 — атом испаренного вещества; 8 — ион испаренного вещества; 9 — средства откачки; 1 — ионизация молекул инертного газа; II — испарение вещества; III — ионизация атомов испаренного вещества; IV — конденсация на подложке

в жидкое, а затем в парообразное. Переход может осуществляться, минуя жидкую фазу, т. е. вещество из твердого состояния переходит в пар. Этот процесс происходит за счет тепловой энергии, подведенной к веществу. Термическое испарение обычно осуществляют при остаточном давлении $1,33 \cdot 10^{-4} - 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Для реализации процесса испарения вещества в вакууме необходимо откачать воздух из камеры до остаточного давления $1,33 \cdot 10^{-4} - 1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, произвести нагрев и обезгаживание испарителя и подложки, нагреть вещество в испарителе до температуры испарения и открыть заслонку для прохождения потока испаряемых частиц к подложке. На рис. 3.3 дана схема, на которой изображены основные элементы вакуумной камеры и контрольно-измерительного средства, необходимые для получения пленок способом термического испарения.

Для описания процесса испарения используются термодинамическая и кинетическая теории. Принципы термодинамики используют для количественной оценки таких параметров, как скорость испарения, взаимодействие между испаряемым веществом и испарителем, стабильность состава испаряемого сложного вещества или состава сплава в процессе испарения. Полученное на их основе уравнение Кнудсена для скорости испарения имеет следующий вид:

$$G = \alpha_v \frac{P_n}{\sqrt{2\pi m k T}}, \quad (3.1)$$

где G — скорость испарения, т. е. число молекул (или атомов), испаренных в единицу времени с единицы поверхности; m — масса молекулы; T — температура, К; k — постоянная Больцмана, равная $1,380 \cdot 10^{-23}$ Дж/град

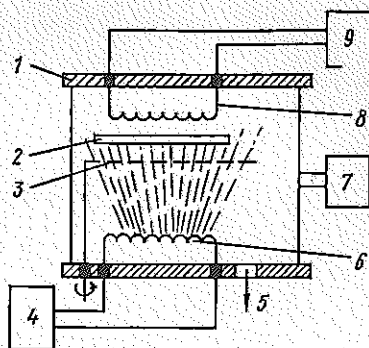


Рис. 3.3. Схема оборудования для термического испарения веществ в вакууме:

1 — вакуумная камера; 2 — подложка; 3 — экран (поворотный); 4 — источник питания испарителя; 5 — средства откачки; 6 — испаритель; 7 — датчик для измерения вакуума; 8 — нагреватель подложки; 9 — источник питания нагревателя

(или $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/град); p_n — давление насыщенного пара, Па; α_v — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости испарения за счет наличия на поверхности жидкого металла окисной пленки, обычно $\alpha_v < 1$.

Следовательно, скорость испарения зависит от величины давления пара P_n и состояния поверхности вещества и испарителя, а давление P_n в свою очередь зависит от температуры следующим образом:

$$\lg p_n = -A/T + B, \quad (3.2)$$

где T — абсолютная температура испаряемого вещества, К; A и B — постоянные, зависящие от испаряемого вещества.

Кинетическая теория позволяет раскрыть процессы испарения и конденсации, а также свойства отдельных частиц.

Частицы испаренного вещества представляют собой атомы (или молекулы), поэтому поток пара вещества является атомарным (или молекулярным).

Пары веществ в ненасыщенном состоянии подчиняются законам кинетической теории газов. Таким образом, формулы, выведенные для газов, являются достаточно точными для ненасыщенных паров. Тепловая энергия, приобретенная атомом вещества при нагреве, равна $3/2 kT$. Для большинства испаряемых металлов величина тепловой энергии составляет при нагреве 1200—2400 К несколько десятых долей электронвольта.

При достаточно высоком вакууме частицы испаренного вещества распространяются от поверхности испарителя до подложки по прямолинейным траекториям, а поток частиц создает определенное парциальное давление.

При испарении вещества с поверхности точечного испарителя интенсивность (плотность) потока испаряющихся частиц $J(r, \theta_r)$ на расстоянии r от поверхности испарителя пропорциональна $\cos \theta_r$, т. е.

$$J(r, \theta_r) = J_v \left(\frac{dA}{\pi r^2} \right) \cos \theta_r, \quad (3.3)$$

где J_v — плотность потока частиц вблизи поверхности испарителя; dA — элемент поверхности испарителя; θ_r — угол между направлением движения потока частиц и нормалью к поверхности испарителя.

В результате нагрева вещества частицы приобретают определенную тепловую энергию и движутся в ваку-

умном пространстве со скоростями, распределенными согласно закону Максвелла. Наиболее вероятная скорость движения частиц ($v_{\text{вер}}$) определяется выражением:

$$\frac{1}{2} m_0 v_{\text{вер}}^2 = kT, \quad (3.4)$$

где m_0 — масса частицы.

Перемещаясь со скоростью около $4,5 \cdot 10^4$ см/с и преодолев расстояние от испарителя до подложки примерно за 10^{-3} с, частицы достигают поверхности подложки и конденсируются.

В процессе конденсации частиц происходит переход вещества из парообразного состояния в жидкое и твердое. Частицы вещества на поверхности подложки сначала образуют отдельные разобщенные центры кристаллизации. С поступлением новых частиц эти центры увеличиваются в размерах, образуя «скопления» — комплексы, отличающиеся большей стабильностью. При осаждении новых частиц происходит их слияние, образование сплошной пленки и рост ее толщины.

Процесс термического испарения веществ осуществляется на промышленных вакуумных напылительных установках, различающихся конструкцией.

На рис. 3.4 показана схема основных этапов получения двухслойной пленочной структуры хром—медь, используемой в производстве ГИС СВЧ.

После подготовки вакуумной камеры к откачке (рис. 3.4, а) в ней создается разрежение до 6,7 Па (рис. 3.4, б) и на высоковольтные вводы подается напряжение для создания электрического разряда — производится ионная очистка поверхности подложки (рис. 3.4, в).

Затем остаточное давление в камере снижают до $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па, производится нагрев подложки до 350°C и осуществляется процесс испарения хрома (рис. 3.4, г). Далее температура подложки снижается до 240°C и испаряется медь (рис. 3.4, д).

По окончании процесса испарения подложка с осажденной пленкой охлаждается до температуры $80—100^\circ\text{C}$ и в камеру впускают воздух (рис. 3.4, е).

В табл. 3.1 приведены некоторые характеристики материалов, используемых для испарения и изготовления испарителей и параметры процесса нанесения пленок термическим испарением в вакууме.

Таблица 3.1

Наименование материала	Состояние испаряемого вещества	Вид испарителя	Параметры процесса		
			t°, C		величина остаточного давления, Па
			испарителя	подложки	
Нихром	Проволока 0,1 мм	Вольфрамовые проволоки	1400—1500	350±10	1,33·10—3
Хром	«Чешуйки» электролитически осажденного слоя	Вольфрамовая спираль	1200—1300	250±10	1,33·10—3
Резистивные сплавы	Суспензия, нанесенная на испаритель Порошок	Вольфрамовые, танталовые ленты Подача порошка из виброниптателя на вольфрамовую ленту	1500—1600	250±10	1,33·10—3
Медь	Гранулы	Молибденовые ленты, тигель, «лодочка»	1800—1900	250—300	1,33·10—3
Алюминий	Гранулы	Вольфрамовые проволоки	1300—1400	240±10	6,7·10—4
Монокись кремния	Порошок	Молибденовый закрытый испаритель — корытца с отверстиями в крышке	1200—1400	150±10	6,7·10—4
Боросиликатное стекло	Порошок	Подача порошка из виброниптателя на вольфрамовую ленту	1300—1400	250±10	6,7·10—3
			1800—1900	130±10*	6,7·10—3

* Осажденный слой диэлектрика проходит дополнительную термообработку на воздухе при температуре $240 \pm 10^\circ \text{C}$ в течение 30 мин.

применяют электронно-лучевые испарители. При электронно-лучевом испарении нагрев происходит за счет кинетической энергии электронов, выделяемой при их столкновении с поверхностью вещества.

Схема электронно-лучевого испарителя приведен на рис. 3.6.

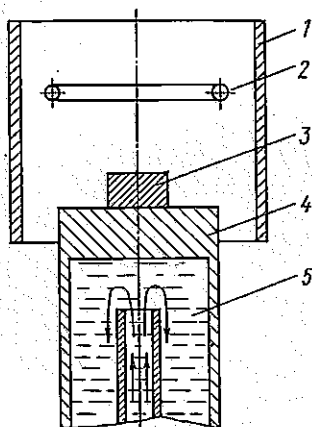


Рис. 3.6. Схема электронно-лучевого испарителя:

1 — цилиндрический фокусирующий электрод; 2 — катод; 3 — испаряемый материал; 4 — держатель; 5 — охлаждающая вода

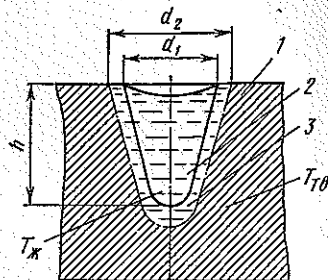


Рис. 3.7. Схема «разрушения» вещества при взаимодействии с электронным лучом:

1 — твердое состояние испаряемого материала; 2 — жидкое состояние материала (d_1); 3 — зона повышенных температур (d_2)

При подаче напряжения из отрицательно заряженного катода 2 происходит испускание — эмиссия электронов. Электроны устремляются к положительно заряженному аноду. Для создания узконаправленного пучка электроны фокусируются цилиндрическим электродом 1, имеющим положительный по отношению к катоду 2 потенциал.

Плотность энергии пучка

$$D = P/S \text{ [кВт/мм}^2\text{]}. \quad (3.5)$$

Мощность электронного пучка

$$P = UI_0 \text{ [Вт]}, \quad (3.6)$$

где U — ускоряющее напряжение, В; I — ток эмиссии катода, А.

При значениях $U=10$ кВ, $I_{\text{эмис}}=100$ мА и диаметр электронного луча $0,1 \text{ мм}^2$ плотность энергии составит

$t \sim 3,3 \text{ кВт/мм}^2$. При таких больших значениях плотности энергии создается температура на поверхности испаряемого вещества в локальной области до нескольких тысяч градусов.

Особенности испарения с использованием электронного луча заключаются в том, что сфокусированный на поверхности вещества электронный луч образует в нем канал (рис. 3.7), глубина которого

$$h = 2,1 \cdot 10^{-8} \frac{U^2}{\gamma}, \quad (3.7)$$

где γ — плотность испаряемого материала.

Внутри канала происходят плавление и мгновенное испарение вещества.

Достоинства процесса термического испарения следующие:

1) возможность нанесения покрытия из различных видов материалов (металлов, сплавов, диэлектриков и соединений) как на малые, так и на большие поверхности подложек; 2) изменение микроструктуры осадка, а следовательно, управление свойствами осажденной пленки; 3) изменение в широких пределах скорости осаждения (от 50 до 2000 А/мин).

Недостатки процесса испарения: 1) необходимость создания остаточного давления менее чем $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$; 2) ограниченность зоны осаждения прямолинейными траекториями полета испаряемых частиц от испарителя, поэтому осаждение материала происходит лишь на поверхности подложек, расположенных в этой зоне; 3) неоднородность толщины покрытия на плоских крупногабаритных подложках; 4) необходимость подбора пары материалов испаряемого вещества и испарителя.

Устранение ряда недостатков процесса термического испарения возможно при использовании метода распыления.

В зависимости от конструктивных особенностей распылительной системы и физических явлений, происходящих в камере, различают катодное и ионно-плазменное распыление.

Катодное распыление осуществляют в двухэлектродной системе. Катод выполняет две функции, являясь источником электронов и распыляемого вещества.

Двухэлектродная система распыления имеет недостатки: низкую скорость распыления и недостаточно эффективную регулировку параметров процесса.

В последнее время наибольшее применение имеет процесс *ионно-плазменного распыления*, осуществляемый в триодной системе. Процесс ионно-плазменного распыления осуществляется в камере 1 (рис. 3.8), в которой при помощи вакуумных насосов 2 создается остаточное давление порядка $1,33 \cdot 10^{-4}$ — $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Затем производят нагрев катода 3 за счет пропускания электрического тока, в результате чего происходит эмиссия электронов. Вводя через натекатель 4 инертный газ в камеру,

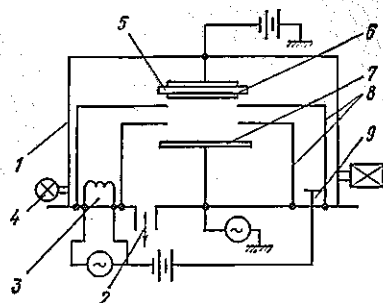


Рис. 3.8. Схема оборудования для ионно-плазменного распыления веществ в вакууме:

1 — вакуумная камера; 2 — средства откачки; 3 — термоэмиссионный катод; 4 — натекатель инертного газа; 5 — подложка; 6 — осаждаемая пленка; 7 — мишень; 8 — электроды, ограничивающие плазму; 9 — анод

повышают давление до $1,33 \cdot 10^{-2}$ — $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па и подают положительный потенциал на анод 9, в результате происходит ионизация газа, т. е. возникают положительно заряженные ионы. Через несколько минут, после того как в системе установится равновесие, на мишень 7 подают отрицательный потенциал ($-600 \div -800$ В).

Положительно заряженные ионы начинают бомбардировать поверхность мишени, в результате чего происходит ее разрушение, и частицы

распыленного вещества, распространяясь в камере, осаждаются на поверхности подложки 5, образуя тонкий слой вещества 6. Обычно процесс ионного распыления осуществляют в атмосфере инертного газа — аргона, который повышает интенсивность распыления и предотвращает окисление распыленных частиц.

При распылении диэлектриков (кварца, сапфира) на мишень необходимо подавать высокочастотную энергию. В противном случае при бомбардировке диэлектрика положительно заряженными ионами на нем накапливается положительный заряд, в результате чего интенсивность распыления снижается.

При подаче высокочастотной энергии в период, когда мишень находится под положительным потенциалом, происходит снятие положительного заряда за счет вза-

имодействия с электронами, при подаче отрицательного потенциала на мишень — ее распыление.

Ионно-плазменное распыление целесообразно применять, когда для элементов схемы используют пленки тугоплавких материалов: тантала, вольфрама или сплавов. Однако процесс получения пленок ионно-плазменным распылением усложняется в связи с наличием в камере заряженных частиц (ионов, электронов), влияющих на структуру и свойства пленок, а также изменяющих условия теплообмена внутри камеры.

По сравнению с простым катодным распылением процесс ионно-плазменного распыления имеет ряд достоинств: увеличенная скорость распыления вещества; улучшенная чистота осажденной пленки; универсальность, т. е. возможность распыления металлов, сплавов, окислов, диэлектриков; безынерционность, т. е. распыление вещества мишени происходит только тогда, когда на мишень подается напряжение.

Таким образом, процесс ионно-плазменного распыления осуществляется в результате бомбардировки положительно заряженными ионами газов поверхности отрицательно заряженной мишени. Мишень изготовляют из материала, вещество которого наносят на подложку. Процесс осуществляется в вакууме при давлении рабочего газа $1,33 \cdot 10^{-2}$ — $1,33$ Па.

Распыленные частицы вещества представляют собой нейтральные атомы. Средняя кинетическая энергия распыленных частиц составляет несколько электронвольт, что значительно выше, чем при термическом испарении.

Эффективность процесса распыления зависит от массы и энергии бомбардирующего иона, угла его падения, давления остаточного газа, состояния поверхности мишени и выражается коэффициентом распыления.

Коэффициент распыления определяется как отношение числа атомов, выбитых из мишени одним ударяющим ионом:

$$K_p = N_{\text{атм}}/N_{\text{ион}} \text{ [атом/ион]}.$$

Типичная зависимость коэффициента распыления от энергии иона указана на рис. 3.9.

На графике даны пять характерных областей: область I — энергия ионов мала (20—50 эВ), распыление не происходит; область II — начало распыления, скорость распыления мала, для практических целей не ис-

пользуется; область *III* — интенсивность распыления достаточна для практического использования при осаждении тонких пленок (до 300 эВ); область *IV* — коэффициент распыления увеличивается с ростом энергии ионов, но медленнее и нелинейно (до 1000 эВ); область *V* (имеет широкий максимум) — коэффициент распыления почти не зависит от энергии ионов.

На рис. 3.10 приведен график зависимости коэффициента распыления от угла падения ионов φ . Как видно, при угле падения, отклоняющемся от нормального до 65° ,

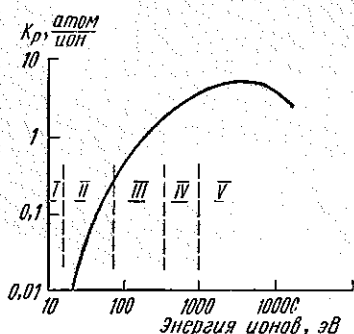


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента распыления от энергии бомбардирующих ионов

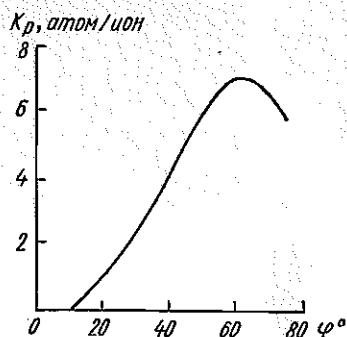


Рис. 3.10. Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов

коэффициент распыления постоянно увеличивается и достигает максимального значения при $60\text{--}65^\circ$, затем происходит снижение интенсивности распылением за счет появления эффекта отражения (рикошета).

Коэффициент распыления зависит также от состояния поверхности мишени, которая не должна содержать окислов и других загрязнений, препятствующих взаимодействию ионов с материалом мишени.

Ионно-термическое испарение. В последние годы разработан новый процесс нанесения пленок, который сочетает достоинства процессов термического испарения и ионно-плазменного распыления, получивший название ионно-термического испарения.

Ионно-термическое испарение — термическое испарение в вакууме с ионизацией потока атомов испаренного

вещества — проводят в среде инертного газа, в которой возбуждается электрический разряд, как и при распылении.

На рис. 3.11 показан один из вариантов установки для ионно-термического испарения. Процесс ионно-термического испарения происходит следующим образом.

Камера откачивается до давления порядка $6,7 \times 10^{-5}$ Па. По достижении высокого вакуума система заполняется аргоном до давления $6,7 \times 10^{-4}$ — $1,33$ Па. Между анодом, который одновременно является источником пара осаждаемого материала (в данном случае — это спиральный испаритель омического нагрева), и катодом, роль которого играет подложка, зажигается разряд. Падение напряжения составляет 1—2,5 кВ, плотность тока разряда поддерживается на уровне около 1 мА/см².

После того как подложка очищается от поверхностных загрязнений за счет бомбардировки положительно заряженными ионами аргона, температура испарителя поднимается до рабочей величины и начинается процесс испарения атомов.

В виде нейтральных частиц атомы существуют лишь короткое время. В пространстве между испарителем и подложкой при взаимодействии с электронами происходит их ионизация.

Ионы вещества кроме тепловой энергии приобретают и кинетическую за счет взаимодействия с электрическим полем, т. е. притягиваются к катоду и в результате скорости конденсации частиц и роста пленки значительно возрастают. Под действием этих сил ионы вещества устремляются к поверхности подложки и, осаждаясь,

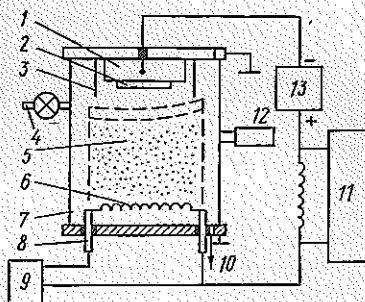


Рис. 3.11. Схема оборудования для ионно-термического испарения:

1 — подложкодержатель; 2 — подложка; 3 — заземленный экран; 4 — регулируемый вентиль для впуска газа; 5 — зона газового разряда; 6 — спиральный испаритель; 7 — камера; 8 — силовые токовводы; 9 — источник питания испарителя; 10 — к высоковакуумным средствам откачки; 11 — устройство контроля и регулировки разрядного тока; 12 — датчик измерения вакуума; 13 — высоковольтный выпрямитель

Таблица 3.2

Наименование параметра	Вид процесса		
	термическое испарение	ионно-плазменное распыление	ионно-термическое испарение
Величина остаточного давления, Па	$1,33 \cdot 10^{-4}$ и менее	$6,7 \cdot 10^{-2} - 1,33$	$6,7 \cdot 10^{-1} - 1,33$
Рабочий газ	—	Инертный газ (аргон)	Инертный газ
Скорость нанесения	Зависит от испаряемого вещества и температуры испарения	Зависит от коэффициента распыления и параметров разряда	Зависит от испаряемого вещества, температуры испарения и подаваемого напряжения
Температура подложки, °C	От 25—30 до 350° C;	зависит от осаждаемого материала	
Температура (°C) и время (мин) термообработки в вакууме	200—400; зависит от вида осаждаемой пленки; 15—30		
Температура испарения, °C	1000—3500; зависит от испаряемого вещества и способа испарения	—	1000—3500; зависит от испаряемого вещества и способа испарения
Напряжение, В	6—32 (при резистивном способе испарения) 10 (при электронно-лучевом способе)	5000—8000 (между мишенью и анодом)	—1000—2500 (к подложкодержателю)
Напряжение смещения (приложено к подложке), В	—	От 0 до —250; зависит от материала пленки	—

образуют пленку. Ионы аргона также перемещаются в направлении к подложке и не препятствуют пролету ионов испаренного вещества. Бомбардируя подложку, они очищают и частично распыляют осажденную пленку.

Поэтому необходимым условием роста пленки является превышение скорости осаждения над скоростью распыления.

Далее приведены основные параметры процессов нанесения пленок в вакууме: величина остаточного давления воздуха P_v или парциального давления газа P_r (Па); состав остаточного газа (в основном для ионного распыления); скорость испарения (или распыления) G [г/(см²·с)]; температура подложки T_n (°C); величина напряжения между мишенью и анодом (для ионного распыления) $U_{ма}$ (кВ); величина напряжения, приложенного к подложкодержателю (для ионно-термического испарения) U_n (кВ); величина напряжения смещения на подложке (для ионного распыления) $U_{см.п}$ (кВ); величины тока эмиссии (для ионного и ионно-термического распыления и испарения) I (мА); температура термической обработки, $T_{то}$ (°C); время термообработки, $t_{то}$ (мин).

В табл. 3.2 приведены основные характеристики процессов нанесения пленок в вакууме.

Электрохимическое осаждение. Это способ осаждения применяется для увеличения толщины проводников микрополосковых линий и нанесения на проводящие элементы верхнего защитного покрытия.

Электрохимическое осаждение (электролиз) протекает в водном растворе, содержащем заряженные ионы: *катионы* и *анионы* различных веществ, при наличии разности потенциалов между электродами.

Процесс электрохимического осаждения состоит из трех последовательных стадий: 1) подхода катиона к электроду из толщи раствора; 2) разряда (нейтрализации) катиона; 3) внедрения атома металла в кристаллическую решетку осаждаемого слоя.

На первой стадии катионы из раствора проходят через двойной электрический слой (6 и 7), образованный на границе «металлизированная поверхность подложки — электролит» (рис. 3.12). В результате они частично освобождаются от окружающих его молекул воды — дегидратируются и адсорбируются на открытой металлизированной поверхности 2 в виде ионов. На второй стадии катионы нейтрализуются, т. е. превращаются в атомы

осаждаемого металла (рис. 3.13). На третьей стадии происходит переход атома в кристаллическую решетку: атом достигает «ступеньки» — излома на поверхности кристалла, представляющей собой недостроенный участок, и «встраивается» в нее.

Основные требования, предъявляемые к процессу электрохимического осаждения, состоят в получении равномерного осадка с минимальными внутренними напряжениями и максимальной электропроводностью.

Процесс электрохимического осаждения производят в ванне, общий вид которой и принципиальная схема питания приведены на рис. 3.14. Ванна

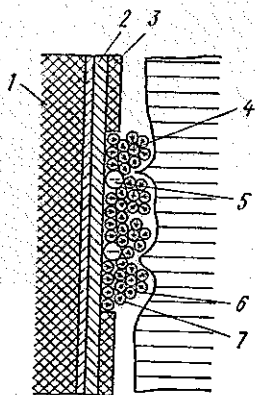


Рис. 3.12. Схема электрически двойного слоя на поверхности металла, находящегося в водном растворе:

1 — подложка; 2 — слой металла; 3 — слой фоторезиста; 4 — катод; 5 — адсорбированный анион; 6 — первичный слой воды; 7 — вторичный слой воды

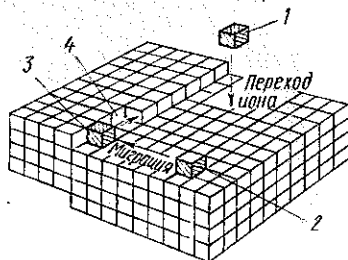


Рис. 3.13. Схема процесса перехода иона из раствора в кристаллическую решетку:

1 — ион в растворе; 2 — адсорбированный ион; 3 — нейтрализованный ион — атом вещества; 4 — недостроенный участок в структуре слоя

состоит из основного (внутреннего) сосуда 2, который наполнен электролитом 3, нагрев электролита осуществляется в данном случае водой 6 определенной температуры, проходящей через наружный сосуд 7. Электропитание осуществляется от сети через источник питания 1 постоянным, переменным или пульсирующим током к катоду — подложке 5 и аноду 8.

Для получения качественных осадков подложка 5, закрепленная на штанге 4, получает возвратно-поступательное движение от кулачка, расположенного на оси электродвигателя (на схеме не показано).

Нагрев электролита в сосуде 2 может осуществляться и от нагревательного прибора, установленного снаружи. В этом случае нет необходимости в использовании сосуда 7. Определенная температура электролита контролируется термометром и поддерживается регулировкой температуры проходящей воды или регулировкой работы нагревательного прибора.

Основной характеристикой электролита является его *рассеивающая способность*, определяющая равномерность распределения металла по поверхности, подвергаемой осаждению. Требованию высокой рассеивающей способности удовлетворяют пирофосфатные и сернокислые электролиты.

Пирофосфатный электролит позволяет получать мелкозернистые плотные блестящие осадки. Однако эти электролиты имеют более высокую стоимость, сложны в приготовлении, требуют точного поддержания состава и условий электролиза.

Сернокислый электролит имеет более простой состав, позволяет получать осадки с меньшими внутренними напряжениями, не требует нагрева.

Основные составы электролитов меднения приведены в табл. 3.3. Важным параметром процесса электрохимического осаждения является *коэффициент разрастания проводника* $K_{\text{рп}}$, который характеризует соотношение скоростей роста осадка в тангенциальном и нормальном направлениях:

$$K_{\text{рп}} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t}, \quad (3.8)$$

где ω_1 и ω_2 — ширина проводника до и после электрохимического осаждения; t — толщина проводника по осевой линии.

Коэффициент разрастания для нормального проте-

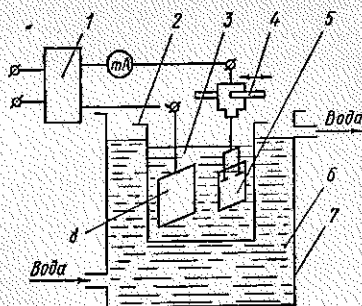


Рис. 3.14. Схема ванны для электрохимического осаждения:

1 — источник постоянного тока; 2 — основная ванна; 3 — электролит; 4 — штанга с зажимом; 5 — подложка; 6 — проточная вода; 7 — наружная ванна; 8 — анод

кания процесса электроосаждения равен двум. При возрастании плотности тока сверх значений, приведенных в табл. 3.3, величина $K_{\text{рп}}$ увеличивается и превышает два.

Процесс электрохимического осаждения может осуществляться на уже сформированном рисунке проводящих элементов схемы (рис. 3.15, а). В этом случае раз-

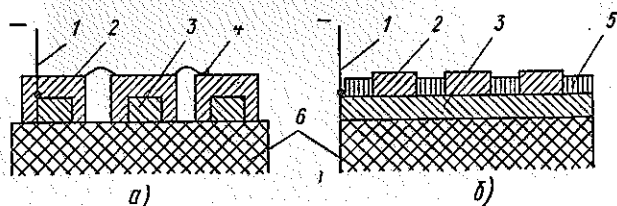


Рис. 3.15. Схема подключения элементов пленочных схем при электрохимическом осаждении:

а — для «положительного»; б — «отрицательного» типов схем: 1 — токоподвод; 2 — электрохимически осаждаемый слой; 3 — слой, нанесенный в вакууме; 4 — проволоочная перемычка; 5 — слой фоторезиста; 6 — подложка

общенные элементы схемы соединяются в замкнутую электрическую цепь при помощи проволоочных перемычек, или в «окнах» фоторезиста (рис. 3.15, б). В последнем случае не требуется приварка технологических пе-

Таблица 3.3

Наименование электролита	Состав электролита	Параметры осаждения
Пирофосфатный	Медь сернокислая 80—90 г/л Калий пирофосфорнокислый 400 г/л Калий азотнокислый 10 г/л Аммиак водный (25%) 3 мг/л, pH раствора 8—8,9	Плотность тока 0,5—0,8 А/дм ² , скорость осаждения 7—10 мкм/ч, температура раствора 55±5°С
Сернокислый	Медь сернокислая 200—250 г/л Кислота серная 50 г/л Блескообразующая добавка 0,6 мл/л Вода дистиллированная 1 л	Плотность тока 0,7—1,6 А/дм ² , скорость осаждения 10—14 мкм/ч, температура раствора 20±5°С

емычек, так как все элементы объединены сплошным лоем, находящимся под фоторезистом.

Электрохимическое осаждение используется для нанесения основного медного проводящего слоя на проводники микрополосковых линий и поверхностного защитного покрытия, толщина которого составляет 1,0—3 мкм. В качестве верхнего защитного покрытия используют серебро или золото. В табл. 3.4 приведены составы электролитов для серебрения и золочения пленочных элементов ГИС СВЧ.

Основные параметры процесса золочения (плотность тока, температура раствора, концентрация золота и кислотность электролита) существенно влияют на качество осадка и производительность процесса, поэтому их необходимо постоянно регулировать и контролировать.

Таблица 3.4

Металл покрытия	Состав электролита	Параметры процесса
серебро	Серебро азотнокисл. 36—43 г Калий железистосинеродистый 100—150 г Калий углекислый 40—50 г Калий роданистый 100—180 г Вода дистиллированная 1 л	Плотность тока 0,1—0,3 А/дм ² , скорость осаждения 2—6 мкм/ч, температура раствора — комнатная
олото	Золото (дицианоаурат калия) 9—10 г/л Калий лимоннокислый однозамещенный 60—80 г/л Кобальт сернокислый 1 г/л Вода дистиллированная 1 л рН раствора 4,5—4,7	Плотность тока 0,6—0,7 А/дм ² , скорость осаждения — 6—7 мкм/ч, температура раствора — комнатная

На рис. 3.16 показан график зависимости скорости осаждения золота от плотности тока. Как видно из графика, зависимость скорости осаждения от плотности тока в интервале от 0,5 до 0,85 А/дм² имеет линейный характер. Однако следует считать оптимальным интервал 0,6—0,7 А/дм². При осаждении золота при плотности тока свыше 0,7 А/дм² возможно возникновение разряда других имеющихся в растворе ионов, в результате качество полученного осадка ухудшается. При плотности тока менее 0,6 А/дм² уменьшается производительность процесса. При плотности тока 0,6—0,7 А/дм² золотое

покрытие имеет металлический блеск, мелкозернистую структуру; цвет покрытия — светложелтый.

На графике рис. 3.17 представлена зависимость скорости осаждения золотого покрытия от температуры электролита. Скорость осаждения практически не зависит от температуры раствора. Однако температура раствора влияет на качество осадка. На образцах, полученных при температуре электролита ниже 27 и выше 34° С, покрытие имело темно-желтый цвет, повышенную шероховатость и пористость, недостаточную адгезию.

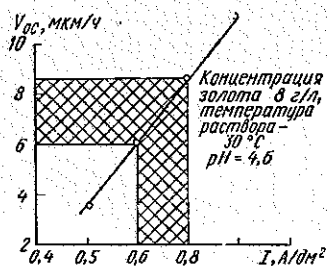


Рис. 3.16. График зависимости скорости осаждения ($v_{ос}$) золота от плотности тока (I)

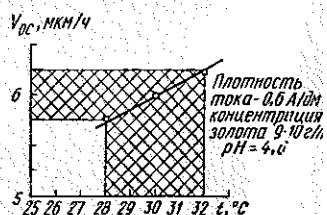


Рис. 3.17. График зависимости скорости осаждения золота ($v_{ос}$) от температуры электролита $t_{эл}$

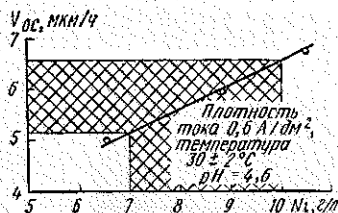


Рис. 3.18. График зависимости скорости осаждения золота ($v_{ос}$) от концентрации золота N ; в электролите

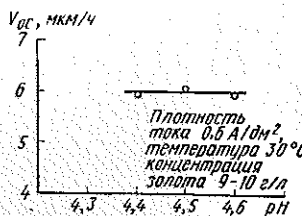


Рис. 3.19. График зависимости скорости осаждения золота ($v_{ос}$) от величины кислотности (pH) электролита

Поэтому для электролитического процесса золочения оптимальный интервал температур составил 28—32° С.

На графике рис. 3.18 показана зависимость скорости осаждения от концентрации золота в составе электролита. От концентрации электролита, т. е. степени насыщения

ости его ионами осаждаемого металла, зависит скорость осаждения металла.

Увеличение концентрации золота (свыше 10 г/л) приводит к получению более рыхлого, крупнокристаллического осадка, а уменьшение (ниже 7 г/л) — к «измельчению» структуры покрытия и замедлению процесса осаждения.

На графике рис. 3.19 дана зависимость между скоростью осаждения и величиной рН электролита. Как видно из графика, в исследуемом интервале рН скорость осаждения золота не зависит от кислотности электролита, однако от величины рН зависят качество осадка и производительность работы электролита. Образцы, полученные при $\text{pH}=3,5$, имеют рыхлую, пористую структуру. Наилучшие по качеству осадки получены при величине $\text{pH}=4,5\div 4,7$.

Трафаретная печать. В основе процесса трафаретной печати лежат явления, определяющие течение жидкости, зависящие от свойств жидкости: ее вязкости и поверхностного натяжения. Оба эти свойства обусловлены наличием сил взаимодействия между молекулами, в первом случае — в жидкости, во втором — между жидкостью соприкасающейся поверхностью подложки.

Вязкость является сложной функцией температуры пасты, а также величины, направления, продолжительности и скорости приложения давления при нанесении пасты через трафарет.

Поверхностное натяжение определяется силами взаимодействия между частицами вещества пасты и молекулами, расположенными на поверхности подложки.

Паста должна иметь определенную величину вязкости, обеспечивающую просачивание ее через «окна» трафарета. При уменьшении вязкости происходят растекание и искажение размеров рисунка; при большой вязкости ухудшается качество отпечатанного рисунка.

На пасту, которую наносят на подложку через отверстие в трафарете, действует сложная система сил, которая включает силу тяжести $P_{\text{тяж}}$, силу давления ракеля $P_{\text{р}}$, силу трения о поверхность «окна» в трафарете $P_{\text{тр}}$, силу поверхностного натяжения $P_{\text{пов.натяж.}}$.

На рис. 3.20 показана схема взаимодействия этих сил. Процесс трафаретной печати осуществляется следующим образом (рис. 3.21). При перемещении ракеля создается гидравлическое давление, под действием ко-

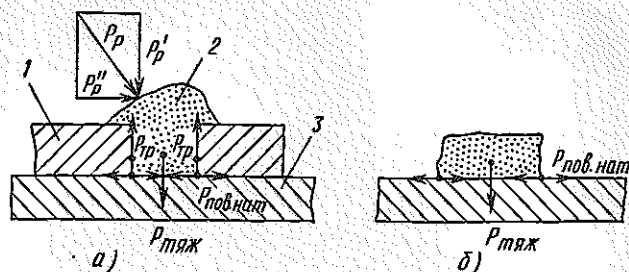


Рис. 3.20. Система сил, действующих на пасту (а — в процессе печати; б — после удаления трафарета):

1 — трафарет; 2 — паста; 3 — подложка

торого паста 2 продавливается через отверстия в трафарете 3, попадая на поверхность подложки 4.

Величина усилия, прикладываемого к ракелю, влияет на качество рисунка и однородность толщины пленки. Выбор величины усилия связан с вязкостью пасты, также с упругими свойствами маски. Усилие, прикладываемое к ракелю, должно создавать давление 0,2—0,5 кг/см².

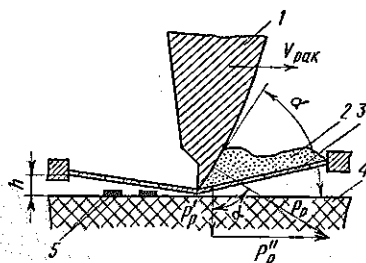


Рис. 3.21. Схема печати через сетчатый трафарет:

1 — ракель; 2 — паста; 3 — трафарет; 4 — подложка; 5 — отпечаток

От величины угла встречи рабочей кромки лезвия ракеля (α) зависит величина гидравлического давления, а следовательно, качество процесса нанесения пасты. Обычно угол наклона

выбирают равным 40—60°. От скорости движения ракеля зависит толщина нанесенной пленки, при увеличении скорости тол-

щина уменьшается. Рекомендуемая величина скорости движения ракеля 50—150 мм/с.

Качество толсто пленочных элементов, полученных печатью, в большей мере определяется конструкцией материалом используемых трафаретов*, или масок.

* В дальнейшем под трафаретом будем понимать тканый сетчатый материал, у которого нитями основы и утка являются моноволоконка нейлона или тонкие стальные проволоки.

Применяемые для печати трафареты различаются по конструкции и способу изготовления (рис. 3.22).

По способу изготовления различают прямые и косвенные трафареты, а по видам применяемых материалов — эмульсионные, комбинированные, металлические и биметаллические.

Трафареты, содержащие эмульсионный слой для получения конфигураций толсто пленочных элементов, называют эмульсионными.

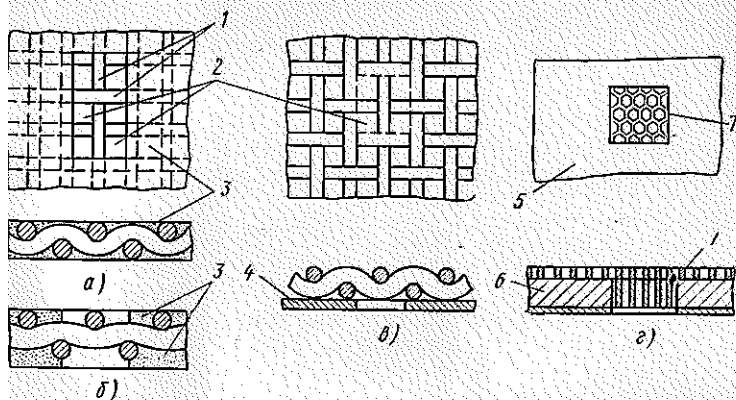


Рис. 3.22. Элементы конструкций трафаретов:

а — прямой эмульсионный; *б* — прямой эмульсионный с утолщенным слоем эмульсии; *в* — косвенный комбинированный; *г* — биметаллический: 1 — металлические проволоки; 2 — отверстия для прохода пасты; 3 — эмульсионный слой; 4 — металлическая фольга; 5 — металлическая основа; 6 — электролитически осажденный слой; 7 — отверстия

Комбинированный металлический трафарет представляет собой соединение металлической сетки с тонкой (25—100 мкм) металлической фольгой, на которой методом травления получен рисунок элементов схемы.

Биметаллический трафарет (маска) состоит из двух металлов: основы и тонкого электролитически осажденного слоя. Этот вид трафарета целесообразно применять при необходимости получения длинных линий относительно простой конфигурации на ровной поверхности подложки. Их не применяют при последовательной многоуровневой печати.

Трафареты, на сетку которых наносят эмульсию или металлическую фольгу с готовым рисунком, называют

трафаретами с косвенным получением рисунка. У трафаретов с прямым получением рисунка первоначально на сетку наносят эмульсионный слой, а затем в нем получают требуемый рисунок.

Для получения трафаретов с косвенным нанесением эмульсии используют какую-либо основу, например лавсановую пленку, на которую наносят светочувствительную эмульсию и подвергают ее сушке, экспонированию, проявлению.

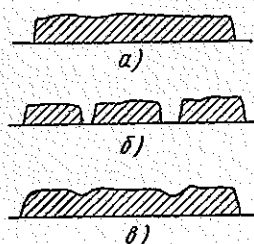


Рис. 3.23. Структура отпечатка:

а — при использовании биметаллического или косвенного эмульсионного трафарета; б — при использовании прямого сетчатого эмульсионного трафарета непосредственно после печати; в — через некоторое время после печати

Готовый дублированный материал (пленка — эмульсия) накладывается на сетку и подвергается сушке. Затем лавсановая пленка удаляется — на сетке остается требуемый рисунок.

Паста, нагнетаемая ракелем через отверстие биметаллического или прямого эмульсионного трафарета с утолщенным слоем эмульсии, образует на подложке сплошную структуру элемента (рис. 3.23, а) еще до отделения трафарета от подложки.

При нанесении пасты через прямой эмульсионный трафарет первоначально образуется разобшенная структура (рис. 3.23, б). После удаления трафарета эта структура за счет «растекания» превращается в сплошную (рис. 3.23, в).

В табл. 3.5 приведена характеристика трафаретов, используемых в производстве толстопленочных ГИС СВЧ.

Плотность расположения нитей в сетке определяется величиной «меш»*, характеризующей долю открытой площади, через которую проходит паста. Чем больше доля открытой площади, тем быстрее проходит паста через сетку.

Выбор сетки с определенным числом меш следует производить с учетом следующих факторов: срока службы трафарета, ширины линии и зазоров между ними в

* Меш — количество отверстий в сетке, приходящихся на линейный дюйм.

Таблица 3.5

Тип трафарета (маски)	Достоинства	Недостатки
Эмульсионный с косвенным нанесением эмульсии	Недорогой, прост в изготовлении, используется многократно, легче получать тонкие линии и сложный рисунок	Становится хрупким, недостаточное воспроизведение отпечатка на подложке. Толщина может изменяться при воздействии растворителей
Эмульсионный с непосредственным нанесением эмульсии	Недорогой, прочный, легко устанавливается, большая точность совмещения рисунка с маской, используется многократно	Может изменяться от воздействия растворителя
Комбинированный металлический	Можно использовать сетку с крупной ячейкой	Требует тщательного контроля совмещения рисунка на фольге с ячейками сетки
Биметаллический	Большая жесткость, не изменяется от воздействия растворителей	Дорогой, восприимчив к неровностям подложки; трудоемок в изготовлении

схеме, профиля подложки, наносимой толщины. Паста должна проходить через сетку, не задерживаясь на ней. Размер отверстия в сетке должен быть примерно в 2,5—5 раз больше по сравнению со средним размером частиц в пасте.

Хорошие результаты получают при использовании сеток с числом меш около 300 и диаметром проволок 30 мкм; доля открытой поверхности составляет около 40%.

Наносимая толщина отпечатка пасты изменяется в зависимости от применяемых сеток, диаметра проволоки и количества отверстий. Если схема имеет мелкие элементы, то требуется использовать сетку с большим числом отверстий (большим числом «меш»), а проволоку — с меньшим диаметром.

Используемые для трафаретной печати сетки — трафареты отличаются по своей твердости, которая характеризуется степенью деформации проволок. На рис. 3.24 приведена конструкция «твердой» и «мягкой» сетки. Изготовленные сетки устанавливают на специальный держатель — рамку, а затем сетку натягивают. Натяжение

сетки влияет на ее положение, от которого зависит также толщина отпечатка. Ослабление натяжения сетки приводит к тому, что возникает явление неконтролируемого снятия частиц пасты с отпечатка на подложке. В результате форма полученного отпечатка будет иметь неровности, большое число отверстий, особенно в местах пересечения проволок сетки.

Количество пасты, остающейся на подложке и возвращающейся с трафаретом, определяется вязкостью пасты

и характером смачивания подложки и проволок трафарета.

Основными характеристиками, определяющими качество трафаретной печати, являются следующие:

для пасты — вязкость, дисперсность составляющих и их соотношение; для подложки — состояние поверхности, плоско-параллельность; для трафарета — тип, номер сетки, размер ячейки сетки, тол-

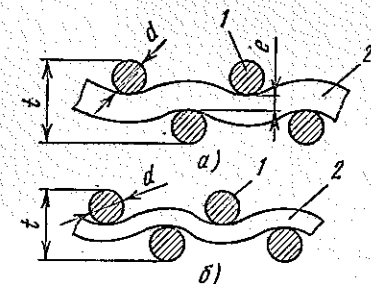


Рис. 3.24. Конструкция сетки (а — «мягкой» ($t = 2d + e$); б — «твердой» ($t = 2d$)).

1 — нить основы; 2 — нить утка; t — общая толщина

щина, натяжение; для ракеля — твердость материала, давление и скорость движения, угол наклона лезвия, величина зазора подложка — трафарет.

Получение пленок способом трафаретной печати включает собственно трафаретную печать; сушку отпечатка и вжигание.

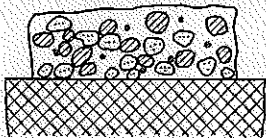
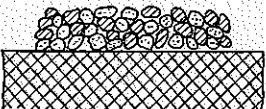
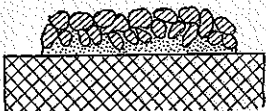
Общая характеристика превращений при получении толсто пленочных элементов дана в табл. 3.6.

Фотолитографическая обработка. Эта обработка включает ряд операций, связанных с обработкой светочувствительного вещества (фоторезиста) и селективным удалением участков осажденных пленочных слоев.

В настоящее время основной способ получения конфигурации пленочных элементов СВЧ-схем — контактный. При контактной фотолитографии используют фотоматрицу с изображением одного слоя схемы.

В зависимости от особенностей взаимодействия с ультрафиолетовым излучением фоторезисты разделяются на два класса — негативные и позитивные.

Таблица 3.6

Наименование этапа	Эскиз	Характеристика превращений
Нанесение на подложку		В процессе нанесе- ния пасты происхо- дит ее контакт и «за- крепление» на опре- деленном участке подложки, а также усадка пасты, вырав- нивание по толщине и краев элементов
Термическая обработка (сушка)		В процессе сушки из состава удаляют- ся жидкие органиче- ские связующие, про- исходит частичное перемешивание ча- стиц
Вжигание		Во время вжигания стеклянная фритта размягчается и сма- чивает поверхность подложки, возникает «сцепление» фритты с подложкой и части- цами функциональ- ных элементов, про- исходит также взаи- модействие фритты с флюсом

Примечание.  — фритта;  — флюс;  — частицы

функциональных элементов;  — органические добавки (связующие).

Негативные фоторезисты под действием облучения, попадающего на их поверхность, образуют участки, которые становятся стойкими к воздействию растворителей. Участки, которые в процессе экспонирования были защищены, при обработке в растворителях удаляются. В данном случае рельеф оставшегося слоя фоторезиста представляет собой негативное (обратное) изображение элементов фотошаблона.

Позитивные фоторезисты повторяют рисунок фотошаблона. Ультрафиолетовое облучение изменяет свойства незащищенных участков, которые при обработке в соответствующих растворах разрушаются.

На рис. 3.25 приведена схема, поясняющая различие свойств, проявляющееся при использовании негативного и позитивного фоторезистов. Фоторезисты должны иметь хорошую светочувствительность и адгезию с металличе-

скими пленками, быть стойкими к агрессивным средам, обладать высокой разрешающей способностью, удовлетворять закону взаимозаместимости.

Для позитивных фоторезистов критерием светочувствительности является полнота разрушения экспонированных участков, впоследствии подвергнутых травлению (проявлению). Для негативных фоторезистов понятие «светочувствительность» связано со способностью к задубливанию или полимеризации экспонированных областей на определенную глубину, достаточную для эффективной защиты от воздействия травящих растворов.

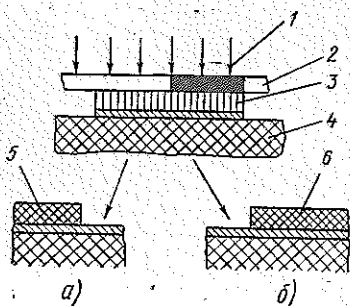


Рис. 3.25. Схема образования рельефа в слое негативного (а) и позитивного (б) фоторезиста при облучении через один фотошаблон:

1 — ультрафиолетовые лучи; 2 — фотошаблон; 3 — слой фоторезиста; 4 — подложка; 5 — участок негативного фоторезиста после проявления; 6 — участок позитивного фоторезиста после проявления

Светочувствительность (S) является величиной, обратной экспозиции (H), которая характеризуется количеством поглощенной световой энергии:

$$S = 1/H = 1/F_{\text{п}} \cdot \tau, \quad (3.9)$$

где $F_{\text{п}}$ — плотность потока световой энергии, т. е. мощность облучения, Дж/см², Вт/см²; τ — время облучения, мин, с.

Адгезия фоторезиста с поверхностью подложки является важным фактором, влияющим на качество фотолитографической обработки. От плотности прилегания слоя фоторезиста к пленке нанесенного металла зависят размеры элементов схемы. На величину адгезии влияет

состояние поверхности подложки, а также степень химического родства вещества фоторезиста и поверхности подложки.

Стойкость фоторезистов к агрессивным средам — это способность выдерживать их воздействие в течение определенного времени и температуры без ухудшения качества. Обычно фоторезист подвергается воздействию кислот, используемых для травления многослойных структур (водных растворов азотной, плавиковой, соляной, серной, а также смесей этих кислот).

Разрешающая способность фоторезистов характеризуется максимальным числом линий минимальной ширины, разделенных промежутком такой же величины, которые можно получить на длине 1 мм при оптимальной освещенности. Чем выше разрешающая способность фоторезиста, тем более мелкие элементы схемы можно получить.

Взаимозаменяемость характеризуется неизменностью фотохимических реакций, происходящих в облученном фоторезисте при одной и той же величине экспозиции H и любых соотношениях мощности облучения F_n и времени облучения (τ).

В табл. 3.7 приведены основные характеристики фоторезистов, применяемых в производстве пленочных ГИС СВЧ.

В фотолитографический процесс входят следующие операции: нанесение на подложку фоторезиста, его сушка, экспонирование, проявление, термическая обработка, которые определяют точностные характеристики элементов пленочных схем и их качество.

Наиболее важным параметром фотолитографического процесса является толщина нанесенного слоя фоторезиста. Ее выбирают из условий, обеспечивающих наименьшее количество дефектов, а также способности обеспечить наибольшую разрешающую способность. Более толстые пленки фоторезиста содержат меньше сквозных проколов, но при этом их разрешающая способность ухудшается.

Толщина фоторезиста влияет также на его адгезию с поверхностью подложки. Основным способом получения равномерной пленки фоторезиста является центрифугирование. Обычно этим способом целесообразно наносить слои фоторезиста толщиной до 2 мкм. Если необходимо получить слой фоторезиста от 3 до 15 мкм,

Таблица 37

Фоторезист			Содержание сухого остатка, %	Кинематическая вязкость $\nu \cdot 10^3$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Разрешающая способность, линий/мм	Светочувствительность, $\text{Дж}/\text{см}^2$, $\text{м} \cdot \text{Ф} \cdot \text{с}$	Маскирующие свойства (% дефектов в пленке)
Наименование	марка	внешний вид					
Негативные	ФН-11	Прозрачная жидкость светло-коричневого цвета	15,6—16,0	7,14—7,16	100 (при толщине пленки 2,5 мкм)	5—10 при «сшивании» на глубину 0,5 мкм	—
Позитивные	ФП-383	Прозрачная жидкость красно-коричневого цвета	21,4	6,14—6,30	Более 400 (при толщине пленки 0,6—0,8 мкм)	—	Не более 3
	ФПРН-7	Прозрачная темно-оранжевого цвета без осадка	19,0—22,0	2,0—2,5	400 (при толщине пленки 0,9 мкм)	—	То же

следует применять метод пульверизации или использовать сухой пленочный фоторезист. При выполнении операции центрифугирования дозированная капля фоторезиста наносится в центр вращающейся подложки. В результате действия центробежных сил капля фоторезиста «разлетается» по всей поверхности подложки; некоторая часть «слетает» с подложки. В результате взаимодействия центробежных сил и сил вязкостного трения основная масса нанесенного фоторезиста распределяется по подложке, покрывая ее ровным слоем.

Толщина слоя фоторезиста $t_{\text{фр}}$ связана с угловой скоростью центрифуги ω и кинематической вязкостью ν фоторезиста следующим выражением:

$$t_{\text{фр}} = k\sqrt{\nu/\omega},$$

где k — коэффициент, зависящий от типа и концентрации фоторезиста.

Готовые растворы фоторезистов, поступающие в производство, имеют колебания вязкости, которая изменяется в процессе хранения. Поэтому скорость вращения

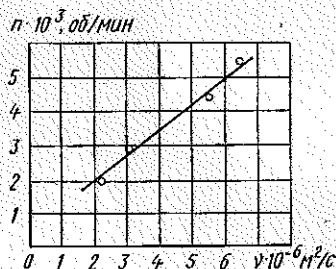


Рис. 3.26. Зависимость числа оборотов вращения подложки (n) с нанесенным фоторезистом от его вязкости (ν)

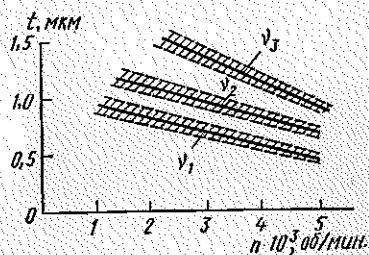


Рис. 3.27. Зависимость толщины слоя фоторезиста (t) от скорости вращения центрифуги (n) для различных случаев вязкости фоторезиста $\nu_3 > \nu_2 > \nu_1$

центрифуги необходимо выбирать в зависимости от реальной вязкости фоторезиста, измеренной перед началом его нанесения.

Взаимосвязь скорости вращения центрифуги и вязкости фоторезиста, обеспечивающая получение толщины слоя в пределах 1 мкм, показана на рис. 3.26. Толщина и равномерность покрытия зависят от скорости центри-

фугирования. При больших скоростях (4000—5000 об/мин) получают более тонкие и равномерные по толщине пленки фоторезиста: разброс по толщине не превышает $\pm 2\%$. При скоростях центрифугирования менее 2000 об/мин разброс по толщине достигает $\pm 10\%$.

На рис. 3.27 приведены графики зависимости толщины нанесенного слоя фоторезиста от скорости вращения центрифуги. Выбор можно производить путем компромиссного решения, которое обеспечило бы получение определенной толщины слоя с учетом равномерности покрытия и минимального числа «проколов» в слое.

Нанесенный на подложку слой фоторезиста подвергается сушке, при которой происходит испарение растворителя, в результате возникают более тесные связи фоторезиста с поверхностью подложки. В процессе сушки в слое

фоторезиста создаются внутренние напряжения, поэтому сушку необходимо осуществлять при постепенном повышении температуры, а распределение тепла по подложке должно быть равномерным.

При сушке фоторезиста происходит также диффузия адсорбированных газов и молекул растворителя к поверхности фоторезиста. По мере затвердения слоя фоторезиста скорость диффузии уменьшается и некоторые

молекулы растворителя или газа могут остаться в слое. Поэтому от температуры, скорости ее роста и времени сушки зависит качество нанесенного слоя.

На рис. 3.28 приведен график взаимосвязи температуры сушки и времени экспонирования.

Как видно из графика рис. 3.28, изменение температуры (зона 1) приводит к необходимости значительного изменения времени экспозиции; при сушке в области оптимальных температур (зона 2) время экспозиции изменяется незначительно.

С целью достижения однородных условий для превращений в слое фоторезиста при экспонировании необходимо в процессе сушки обеспечить равномерное распре-

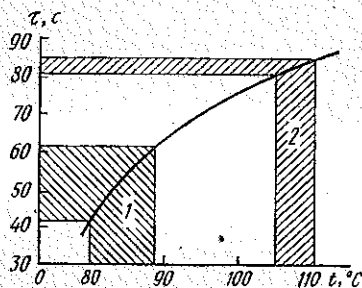


Рис. 3.28. Зависимость времени экспонирования (τ) от температуры сушки ($^{\circ}\text{C}$)

деление температуры по поверхности подложки. Это условие можно обеспечить в печи с равномерным распределением тепла в зоне размещения подложек.

Подложки, прошедшие предварительную сушку, поступают на экспонирование, т. е. облучаются эффективным источником ультрафиолетового излучения. При экспонировании облучается слой фоторезиста, незащищенный фотонепроницаемыми участками шаблона.

В процессе экспонирования в слое фоторезиста происходят основные реакции, в результате которых изменяются его свойства. Результат фотохимической реакции зависит от экспозиции. Условия экспонирования выбирают в зависимости от вида фоторезиста и его толщины, вида излучателя и оптической плотности фотошаблона.

В процессе экспонирования необходимо обеспечить такие условия, чтобы поглощение слоем фоторезиста ультрафиолетовой энергии было бы наибольшим. Поэтому при выборе источника облучения необходимо исходить из спектральных характеристик фоторезиста, приближая к ним спектральные характеристики источников освещения.

В качестве источников ультрафиолетового света обычно используют ртутно-ксеноновые, ртутно-кварцевые или иодокварцевые лампы.

За экспонированием следует, проявление фоторезиста, которое состоит в удалении с подложки ненужных его участков. У негативного фоторезиста удаляются необлученные участки, у позитивного — подвергнутые облучению. В результате выполнения этой операции на поверхности подложки остается фоторезистивная маска с «окнами», открывающими участки пленочной структуры, которые впоследствии должны удалиться.

После проявления фоторезиста можно оценить, насколько правильно выбраны операции сушки и экспонирования. Критерием качества служат достигнутые размеры элементов фоторезиста и прочность прилегания к поверхности осажденных пленок.

Последним этапом обработки фоторезиста является термическая обработка. Она проводится с целью увеличения стойкости фоторезистивной маски к воздействию химических растворов, используемых для травления пленочных структур. Основные режимы обработки фоторезистов даны в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Тип фоторезиста	Скорость вращения центрифуги, n , об/мин	Предварительная сушка		Время экспонирования (лампа ДРШ-250, освещенность 40 тыс. лк), с	Состав растворов и режимы проявления	Термическая обработка	
		°C	τ , мин			t , °C	τ , мин
Негативный ФН-11	1000	100	10	5	В растворе толуола (1 ч) и ксилола (1 ч) при комнатной температуре в течение 110—120 с	100	30
Позитивный ФП-383	2000	100	10	40—50	В растворе натрия фосфорнокислого трехзамещенного при комнатной температуре в течение 40—50 с	100 и 150	10 15
ФПРН-7	2000	20—25 и 100	20 15	15—20	В растворе гидрата окиси калия (500 г) в воде (100 мл) при комнатной температуре в течение 30—50 с	20—25 и 130	20 20

Последующая обработка плат состоит в утолщении открытых участков электрохимическим методом или в удалении методом травления.

Селективное травление. Это процесс избирательного удаления участков пленочной структуры, осуществляемый за счет химической реакции веществ пленки с травящим раствором, при условии активного взаимодействия раствора с одним веществом.

При химическом травлении многослойных пленочных структур используются селективные травители, которые должны удовлетворять следующим требованиям: обеспечивать высокую скорость травления основного вещества; реагировать только с обрабатываемым веществом и не разрушать фоторезист или другие вещества; реакция растворения вещества пленки должна протекать без выделения пузырьков газа.

Травление осажденных пленок является сложным процессом, а скорость протекания реакции растворения пленки отличается от процесса травления массивных веществ.

Скорость травления пленок зависит от состава травящего раствора, его температуры и ограничивается диффузией травителя и продуктов реакции.

Скорость травления при погружении платы в травитель

$$v_{\text{тр}} = t/\tau_0 \text{ [мкм/с]}, \quad (3.11)$$

где t — толщина пленки, удаляемая в процессе травления, мкм; τ_0 — время травления, с.

Выбор травителя зависит от вида пленочного материала, подвергаемого травлению.

В табл. 3.9 приведены типовые травящие растворы для различных металлов и сплавов, из которых получают элементы пленочных ГИС СВЧ.

Процесс взаимодействия травящего раствора с незащищенным участком пленки развивается следующим образом (рис. 3.29).

На начальном этапе (рис. 3.29, а) «фронт» взаимодействия травителя с веществом пленки развивается в направлении I и II. Реакция в направлении I полезна, так как происходит удаление с подложки «лишних» участков слоя. Как только граница протекания реакции достигнет подслоя 4 (рис. 3.29, б), протекание процесса нежелательно, так как происходит воздействие травителя на

Таблица 3.9

Материал пленки	Состав раствора	Параметры травления
Медь	а) Аммоний надсернистый 300 г, кислота серная (уд. вес 1,84) 15 мл Вода дистиллированная—1000 мл; б) Ангидрид хромовый 450 г Кислота серная (уд. вес 1,84) 50 мл Вода дистиллированная 1000 мл	Температура раствора 35—40° С, скорость травления 1 мкм/мин
Нихром	Кислота серная (уд. вес 1,84) 100 мл Кислота соляная 100 мл Вода дистиллированная 100 мл	Применять для получения резисторов: температура раствора 75±5° С, скорость травления 0,01 мкм/мин
Хром	Калий железосинеродистый 300 г Натр едкий 45 г Вода дистиллированная 1000 мл; или кислота соляная 20 мл и вода дистиллированная 80 мл	Применять для травления адгезионного подслоя: температура раствора — комнатная Температура раствора 65±5° С, время травления пленки сопротивлением 200—500 Ом/кв — 5—8 с
Сплавы кремниевые резистивные	а) При наличии в схеме медных незащищенных проводников Кислота плавиковая 500 мл Кислота соляная 100 мл Натрий фтористый 10 г Вода дистиллированная 10 мл б) При наличии в схеме защищенных медных проводников Кислота плавиковая 5 мл Кислота азотная 35 мл Вода дистиллированная 60 мл Кислота плавиковая 500 мл Кислота соляная 100 мл Натрий фтористый 10 г Вода дистиллированная 10 мл	Температура раствора 20—25° С, при недостаточной скорости травления раствор нагреть до температуры 70—80 °С Для сплавов, содержащих Cr, Fe, Ni, Si, температура раствора 20—25° С Для сплавов, содержащих Cr, Fe, Si, температура раствора 20—25° С

Материал пленки	Состав раствора	Параметры травления
Сплавы кремниевые резистивные	Кислота соляная 90 мл Кислота плавиковая 10 мл	Для сплавов, содержащих Cr, Fe, Ni, W, Si, температура раствора $30 \pm \pm 5^\circ \text{C}$

нижележащий подслои, и слой 3, находящийся под фоторезистом 2. Однако для полной гарантии удаления частиц слоя 6 с подслоя необходима некоторая выдержка, во время которой травитель, воздействуя на слой 3, изменяет его форму (рис. 3.29, в).

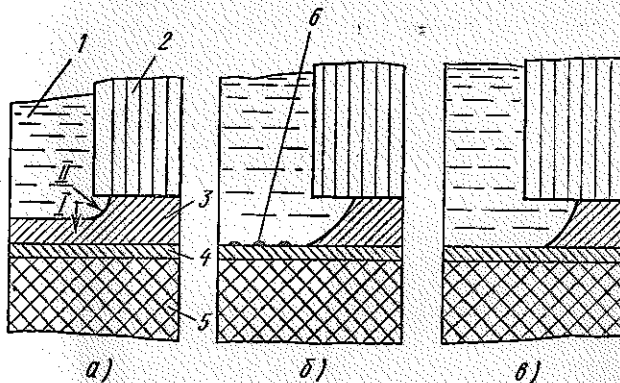


Рис. 3.29. Основные стадии травления двухслойной пленочной структуры:

a — начальная стадия; *б* — нормальное окончание травления; *в* — последствие процесса травления; *II* — нормальное и нежелательное направление реакции; *1* — травитель; *2* — слой фоторезиста; *3* — основной слой, подвергавшийся травлению; *4* — подслои; *5* — подложка; *6* — частицы основного слоя

Убедившись в том, что пленка полностью удалена, оператор переносит плату в сосуд с водой для промывки. В этот период времени процесс травления протекает за счет наличия на плате остатков травящего раствора.

Таким образом, общее время травления можно выразить следующей формулой:

$$\tau_{\text{общ}} = (\tau_0 \pm \Delta\tau) + \tau_{\text{доп}} + \tau_{\text{носл}}, \quad (3.12)$$

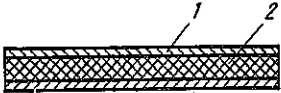
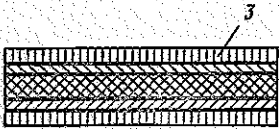
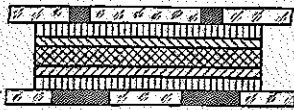
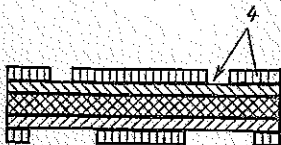
где t_0 — теоретическое время травления, определяемое формулой (3.11); Δt — ошибка в окончании процесса; $t_{\text{доп}}$ — дополнительное время травления, необходимое в некоторых случаях для полного качественного удаления участков пленки с подложки; $t_{\text{посл}}$ — время продолжения процесса травления после удаления платы из травителя.

Следует отметить, что если в период t_0 и $t_{\text{доп}}$ травление протекает со скоростью $v_{\text{тр}}$, то в период $t_{\text{посл}}$ скорость травления постепенно уменьшается от $v_{\text{тр}}$ до нуля.

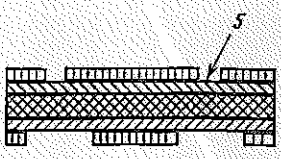
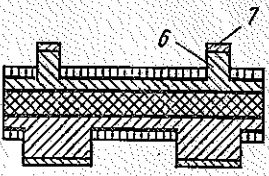
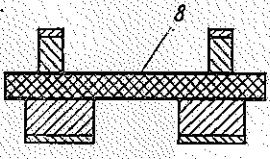
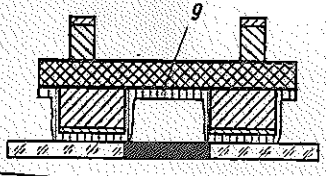
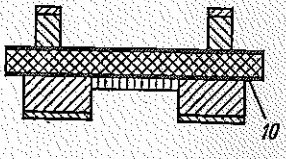
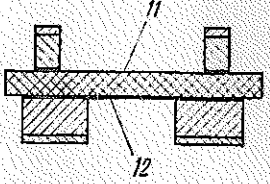
Изменение размеров и формы элементов в процессе травления рассмотрено в § 3.3.

В табл. 3.10 приведены последовательные этапы процессов: напыления в вакууме, фотолитографической об-

Таблица 3.10

Выполняемая операция	Содержание операции
	Напыление в вакууме 1 структуры «хром-медь-хром», 2 — с двух сторон подложки
	а — формирование микрополосковых линий; 3 — нанесение и сушка фоторезистора «ФН-11»
	Экспонирование поочередно с двух сторон
	4 — проявление и сушка слоя фоторезиста

Продолжение табл. 3.10

Выполняемая операция	Содержание операции
	5 — травление хрома с двух сторон
	6 — гальваническое наращивание меди, 7 — золота в «окнах» фоторезистивной маски
	Снятие фоторезиста и травление слоев 8 — хрома и меди
	6 — формирование резисторов; 9 — нанесение фоторезиста «ФП-383» и экспонирование
	10 — проявление фоторезиста «ФП-383»
	11 — травление резистивного слоя; 12 — снятие фоторезиста «ФП-383»

работки, селективного травления и электрохимического осаждения, используемые при изготовлении двусторонних пленочных схем.

Термическая обработка пленок. Назначение термической обработки состоит в дополнительном тепловом воздействии, которое приводит к упорядочению структуры осажденной пленки, повышению стабильности и улучшению свойств.

В процессе термообработки пленка поглощает тепловую энергию пропорционально температуре и времени ее нагрева.

Общий характер изменения электросопротивления от температуры термообработки приведен на рис. 3.30.

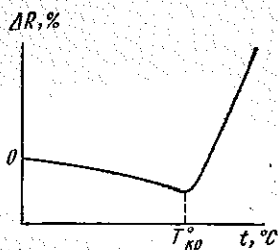


Рис. 3.30. Общая зависимость изменения сопротивления пленок от температуры при термической обработке

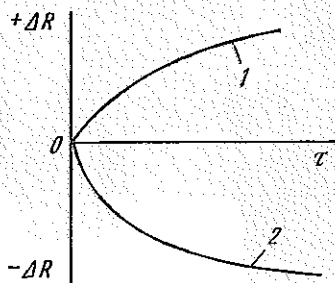


Рис. 3.31. Характер изменения сопротивления резистивных пленок при термической обработке:

1 — в окислительной атмосфере;
2 — в вакууме

В начальной стадии термообработки (при отсутствии окисления) происходит уменьшение электросопротивления за счет «отжига» дефектов (см. рис. 3.30, участок 1), затем с увеличением температуры нагрева электросопротивление пленок возрастает за счет явления *агломерации* — пленка приобретает «островковую» структуру (см. рис. 3.30, участок 2).

Термическая обработка тонкопленочных элементов проводится в вакууме или на воздухе. Обработка в вакууме не изменяет их химического состава; при обработке пленок в окислительной атмосфере происходит их окисление по поверхности или границам зерен — в результате химический состав пленок частично изменяется.

В процессе термической обработки происходит изменение сопротивления пленок. Характер и величина изменения сопротивления зависит от среды, в которой осуществляется обработка, а также от температуры и времени обработки. Общий характер изменения сопротивления резистивных пленок при обработке в вакууме и окислительной атмосфере показан на рис. 3.31.

Требуемые физические и электрические свойства толстых пленок получают в результате физико-химических реакций, протекающих в процессе термообработки, которая проводится в два этапа. Первый этап — низкотемпературная *сушка*, второй — высокотемпературный *обжиг*, называемый *вжиганием*.

Сушку осуществляют при невысокой температуре (100—150°С): время сушки зависит от вида пасты и составляет 5—15 мин. В процессе сушки из паст удаляют органические добавки. Для сушки подложек с нанесенной пастой можно использовать термостаты или инфракрасные лампы.

Вжигание — это физико-химический процесс, в результате которого дисперсная подвижная система (паста) превращается в механически прочное плотное тело.

Физико-химические превращения сопровождаются уменьшением суммарной поверхности системы за счет взаимного контактирования частиц пасты, т. е. уменьшением свободной энергии всей дисперсной системы. В процессе вжигания возникают реакции между компонентами пасты, частицами пасты и подложкой; частицы пасты также вступают в реакцию с окружающей средой, а также с частицами других нанесенных паст.

В табл. 3.11 даны виды физических превращений и химических реакций, происходящих в пастах, применяемых в производстве толстопленочных ГИС СВЧ.

В резистивных пастах в связи с наличием большого числа компонентов происходят более сложные реакции.

В зависимости от характера протекания химических реакций при вжигании пасты различают статические и динамические системы.

Статические системы имеют минимальную зависимость величины сопротивления и ТКР от максимальной температуры и времени вжигания. Химическая реакция в этом случае протекает практически полностью. Наиболее распространенной композицией статической системы являются окись палладия, серебро и стекло.

Таблица 3.11

Тип пасты	Вид взаимодействия		
	между компонентами пасты	между компонентами пасты и материалом подложки	между компонентами пасты и атмосферой
Проводящая	Спекание и образование сплавов металлических частиц; спекание металлических частиц с компонентами стекла; реакция между компонентами постоянного связующего	Взаимная растворимость стеклофазы подложки и фритты; частичная реакция между окислами металла и стеклофазой подложки	Образование окислов в окислительной атмосфере или нитридов в воздушной атмосфере
Резистивная	Спекание и образование сплавов и окислов; частичное разложение компонентов, например $PdO \rightarrow Pd + \frac{1}{2}O_2$, и образование на частицах окисла (например, таллия) активного слоя	Взаимодействие между стеклофазой подложки и связующим	Окисление или разложение функциональных металлов
Диэлектрическая	Спекание диэлектрических частиц с фриттой	Взаимодействие между стеклофазой подложки и фриттой	—

Для этой системы химическая реакция имеет следующий вид:



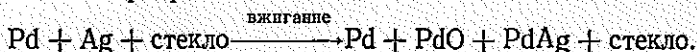
Динамические системы такие, у которых электрические характеристики являются функцией температуры и времени.

Например, удельное сопротивление ρ динамических систем зависит от температуры вжигания T следующим образом:

$$\rho = T A \exp(-\beta/kT), \quad (3.13)$$

где A и β — постоянные, зависящие от состава пасты и режимов вжигания; T — абсолютная температура, К; k — постоянная Больцмана.

Химическая реакция для динамической системы палладий — серебро имеет вид:



В этой системе сопротивление резистора определяется концентрацией окисла палладия, которая зависит от температуры и времени вжигания.

На рис. 3.32 приведены типичные температурные режимы вжигания паст. При вжигании нескольких паст необходимо соблюдать такую последовательность, при которой каждое последующее вжигание происходило бы при более низкой температуре, чем предыдущее. Желательно, чтобы последним этапом процесса изготовления толсто пленочной схемы было вжигание резистивных слоев.

Рассмотренные процессы относятся к категории групповых (интегральных) и обеспечивают получение пленочных элементов ГИС СВЧ. В отличие от этих процессов рассмотренные в § 3.2 процессы сборки ГИС СВЧ являются процессами индивидуальной обработки.

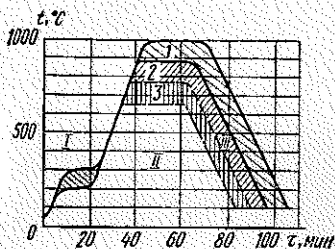


Рис. 3.32. Диаграмма сушки и вжигания паст, используемых в производстве толсто пленочных схем:

1 — проводящих; 2 — диэлектрических; 3 — резистивных; I — зона сушки; II — зона вжигания; III — зона охлаждения

§ 3.2. Сборка ГИС СВЧ

Установка и присоединение дискретных компонентов. При проектировании ГИС СВЧ могут быть использованы различные навесные компоненты: конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы.

Вопрос о целесообразности создания пассивных элементов в пленочном виде или использования дискретных навесных компонентов определяется требуемыми характеристиками ГИС СВЧ и ее конструкцией.

Полупроводниковые приборы (диоды и транзисторы) используются в ГИС СВЧ только в виде дискретных навесных компонентов и являются неотъемлемой частью таких устройств, как усилители, смесители, генераторы и др. Дискретные СВЧ полупроводниковые приборы имеют преимущества по мощности и частоте перед монолитными интегральными схемами. Дискретные компоненты, используемые для ГИС СВЧ, имеют бескорпусное оформление.

В табл. 3.12 приведены некоторые виды дискретных навесных компонентов, используемых в ГИС СВЧ, и описаны методы их монтажа.

Отсутствие корпуса у полупроводниковых приборов позволяет улучшить СВЧ-характеристики устройств, снизить их габаритные размеры и вес. Однако лишенные корпуса бескорпусные компоненты легко подвергаются механическим повреждениям, воздействию электростатических зарядов, влаги, окружающей пыли и загрязнения, их трудно маркировать.

По конструкции полупроводниковые СВЧ-приборы могут быть следующих видов: 1) к полупроводниковому кристаллу присоединены непосредственно ленточные или проводочные выводы; 2) полупроводниковый кристалл имеет в местах контактных площадок возвышения — «бугорки»; 3) полупроводниковый кристалл присоединен к вспомогательной опоре — «пьедесталу».

Бескорпусные конденсаторы, как правило, используют двух видов: 1) на основе диэлектрического (керамического) материала и 2) на основе полупроводниковой структуры «металл — диэлектрик — полупроводник» (МДП). Первые имеют высокие добротность и стабильность электрических характеристик, однако их габаритные размеры по сравнению с МДП-конденсаторами велики.

Выбор способа установки и монтажа компонентов на плату ГИС СВЧ зависит от их конструкции.

Основные варианты установки и присоединения дискретных компонентов на плату ГИС СВЧ приведены на рис. 3.33.

Если компонент имеет ленточные планарные выводы, ширина которых соизмерима с размерами проводника МПЛ, то его устанавливают на рабочей поверхности

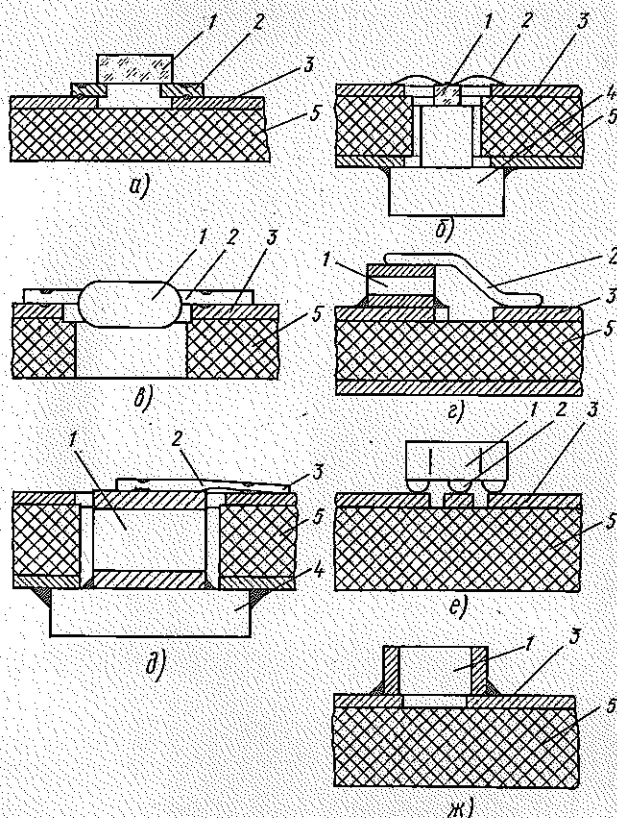
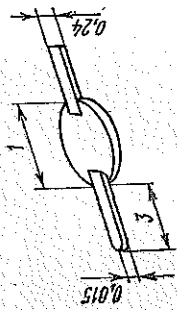
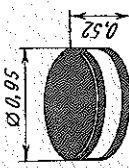
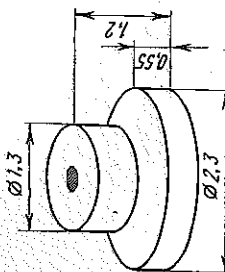


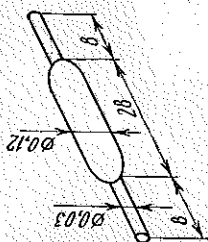
Рис. 3.33. Варианты установки и присоединения дискретных компонентов к плате ГИС СВЧ:

a — на рабочей поверхности платы; *б* — снизу в отверстие платы; *в* — на рабочей поверхности в овальное отверстие в плате; *г* — на контактной площадке; *д* — на нижней металлизированной плоскости; *е* — на контактные площадки; *ж* — на облуженные контактные площадки;
1 — дискретный компонент; 2 — выводы; 3 — микрополосковая линия; 4 — вспомогательное технологическое основание — «пьедестал»; 5 — плата

Таблица 3.12

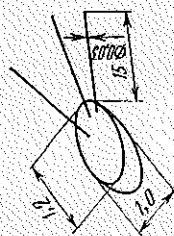
Наименование компонента	Рисунок	Рекомендации по монтажу
Диоды: смесительный		Диод устанавливается в разрыв микрополосковой линии методом термокомпрессионной или ультразвуковой сварки, нагрев диода в процессе сварки не должен превышать $+125^{\circ}\text{C}$; диод необходимо «охранять» от статического электричества и использовать в составе герметизированных ГИС СВЧ
переключающий		Верхняя и нижняя поверхности диода имеют золотое покрытие, диод устанавливается методом пайки, а температура не должна превышать 230°C
туннельный усилительный		Диод устанавливается в схему механическим прижимом или приваркой ленточных выводов к диоду и микрополосковой линии; допускается припайка, не вызывающая нагрева выше $+70^{\circ}\text{C}$

смесительный

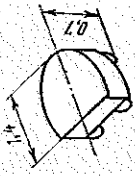
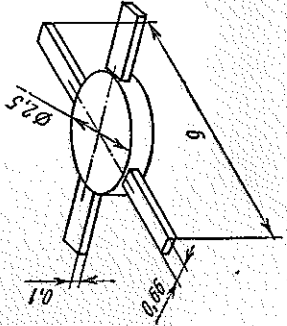


Монтаж выводов диода осуществляется методом пайки при температуре не более 100° С

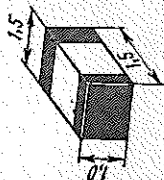
Транзисторы:
с проволочными вы-
водами



Устанавливается на микросхему сваркой или пайкой выводов; температура пайки не более 180° С в течение 5 с; пайка (сварка) выводов допускается на расстоянии не ближе 1 мм от защитного покрытия; применять в составе герметизированных микросхем

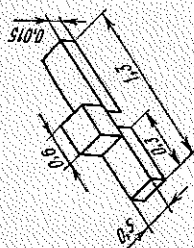
Наименование компонента	Рисунок	Рекомендации по монтажу
с шариковыми выводами		Монтаж рекомендуется производить на теплопроводящие платы. Максимальная допустимая температура пайки 260°С в течение 5 с; «бонтсы» статического электричества
с ленточными выводами		Приклеивается к плате лаком УР-231; монтируется методом пайки на расстоянии не ближе 1,5 мм от корпуса; температура пайки не выше 260°С; при пайке на расстоянии 0,5 мм: температура 140°С; время не более 3 с; перед пайкой выводы промыть спиртом, а затем смочить флюсом (10—40% канфоли, 90—60% спирта); «бонтсы» статического электричества

конденсаторы:
керамические



Монтируется методом пайки: рекомендуемый припой ПОСК 50—18 или ПОРОСЗ-58; время пайки не более 3 с

полупроводниковые
(со структурой «не-
талл-диэлектрик-
полупроводник»)



Монтируется методом сварки или с использованием токопроводящего клея — контактола; бонты статического электричества

платы в разрыв проводника МПЛ (рис. 3.34, *а*). Компоненты, имеющие вспомогательное технологическое основание, устанавливают снизу в цилиндрические отверстия в плате; основание припаивают к металлизированной поверхности, затем приваривают выводы к проводникам на рабочей поверхности платы (рис. 3.34, *б*, *д*). Если выводы компонента расположены не в одной плоскости с его корпусом, то часть корпуса погружают в отверстие на плате, чтобы исключить их формовку (рис. 3.34, *в*). На рис. 3.34, *г*, *е*, *ж* приведены компоненты, которые присоединяются к рабочей поверхности способом пайки.

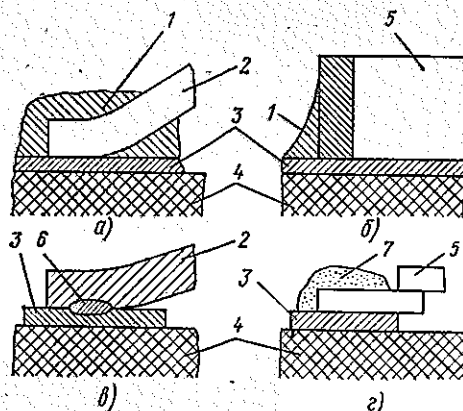


Рис. 3.34. Схемы монтажа дискретных компонентов:
а, *б* — методом пайки; *в* — методом сварки; *г* — с использованием токопроводящего клея:

1 — припой; 2 — вывод компонента; 3 — пленка; 4 — подложка; 5 — дискретный компонент; 6 — зона «физического» контакта; 7 — токопроводящий клеевой состав

Операции сборки и монтажа дискретных компонентов включают их установку, закрепление в определенном месте платы при помощи клея и получение надежного электрического контакта выводов компонента с пленочными контактными площадками.

Независимо от способа монтажа дискретных компонентов соединение вывода с пленкой должно иметь: низкое омическое сопротивление, высокую механическую прочность и коррозионную стойкость, надежность в процессе эксплуатации. При установке и монтаже дискретных компонентов необходимо обеспечить точность его размещения на плате.

Монтаж дискретных компонентов ГИС СВЧ можно выполнять при помощи пайки, сварки или токопроводящего клея (рис. 3.34). При выборе метода соединения необходимо учитывать вид дискретного компонента; размер и форму выводов; плотность размещения компонентов.

Присоединение относительно толстых проводников диаметром 80—100 мкм или лент сечением 100×100 мкм к пленочным контактным площадкам целесообразно выполнять пайкой. Выбор пайки обусловлен большой жесткостью проводников и усилиями, которые могут передавать проводники на контактные площадки. В случае пайки проводника в передаче усилия участвует припой, «связанный» со всей контактной площадкой (рис. 3.34, а, б). Поэтому удельная механическая нагрузка в этом случае уменьшается.

Проводник, приваренный к площадке, имеет малую площадь контакта (рис. 3.34, в). При малой площади контакта в случае приложения значительных усилий, а также из-за относительно невысокой адгезии пленки с подложкой в месте присоединения вывода может произойти разрушение — отрыв пленки от подложки.

Присоединение элементов можно осуществлять и при помощи *токопроводящих клеев*. Их применяют в тех случаях, когда дискретный компонент «чувствителен» к нагреву в процессе его монтажа.

При использовании токопроводящего клея небольшую его порцию наносят на проводник схемы, а затем устанавливают дискретный компонент (рис. 3.34, г). В таком состоянии схему подвергают сушке на воздухе или при небольшой ($70\text{--}100^\circ\text{C}$) повышенной температуре.

На механическую прочность соединений выводов дискретных компонентов с материалом пленки существенно влияют ее толщина и состояние поверхности, режимы сварки или пайки, состав и условия сушки токопроводящего клея.

Корпусирование и защита от внешних воздействий ГИС СВЧ. Для корпусирования низкочастотных схем имеется большая номенклатура корпусов: металлостеклянных, металлокерамических, металлополимерных, каждый из которых предназначен для размещения платы унифицированного размера. Плата с навесными компонентами, заключенная в герметичный корпус и соединенная с его выводами, представляет собой законченное микроразностное устройство.

При создании ГИС СВЧ можно располагать на одной плате целую систему и корпусировать ее или размещать каждый функциональный модуль на отдельной плате, которые затем соединять в одном корпусе.

При размещении сложной ГИС СВЧ на одной плате возникают трудности, обусловленные размерами платы, которые не превышают 60×48 мм. Кроме того, при объединении нескольких самостоятельных устройств на одной плате затрудняется их проверка и настройка. Поэтому в пределах одной платы, имеющей собственный корпус, целесообразно создавать законченные функциональные ГИС СВЧ, которые широко применяются и имеют самостоятельное функциональное назначение. Примером такого устройства является усилитель СВЧ.

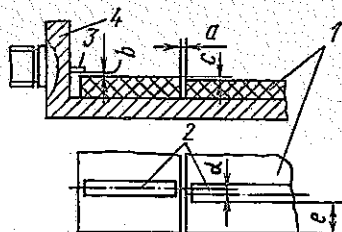


Рис. 3.35. «Стыковка» плат в корпусе:

1 — платы; 2 — проводник МПЛ;
3 — внутренний проводник СВЧ коаксиально-полоскового соединителя;
4 — корпус

Многофункциональные СВЧ-устройства (микросборки) содержат несколько плат, каждая из которых выполняет определенную радиотехническую функцию. Плата является пассивной или активной ГИС СВЧ и независимой частью СВЧ-устройства с 50-омным входом и выходом. Отдельные платы, составляющие многофункциональное СВЧ-гибридное пленочное устройство, объединяются в одном корпусе.

Процесс сборки микрополосковых плат в корпус (корпусирование) состоит из ряда операций по установке и присоединению платы к корпусу; соединению плат между собой, с внутренним проводником СВЧ коаксиально-полоскового переходника или низкочастотными выводами.

Одно из важнейших требований, которое необходимо обеспечить при сборке ГИС СВЧ, является высокая точность установки плат в корпусе.

В процессе сборки необходимо обеспечить следующие требования (рис. 3.35): зазор (a) между микрополосковыми платами в пределах $0,1-0,15$ мм с точностью не хуже $\pm 0,05$ мм; зазор ($б$) между внутренним проводником коаксиально-полоскового соединителя и плоскостью

микрополосковой платы в пределах $0,2 \pm 0,05$ мм; плоскостность (c) микрополосковых плат в пределах $0,2-0,3$ мм; относительную несоосность ($d_{\text{отн}}$) проводников микрополосковых линий стыкуемых плат в пределах $(0,2-0,3)\omega$, где ω — ширина проводника МПЛ; точность размещения проводников МПЛ относительно базовой кромки платы (e) в пределах $\pm 0,05$ мм.

Приведенные границы изменения величин относятся к ГИС СВЧ, используемым в диапазоне частот от 1 до 10 ГГц, причем меньшую величину параметра, т. е. более высокую точность, необходимо обеспечить для схем, работающих при более высоких частотах.

Указанные требования обеспечиваются: высокой точностью механической обработки корпуса и плат (геометрические размеры платы с точностью до 0,02 мм и углом $90 \pm 3^\circ$ обеспечиваются шлифовкой торцов), а также использованием специальных приспособлений при сборке.

При выполнении операций корпусирования необходимо создать надежный электрический контакт между экранной поверхностью микрополосковой платы и соответствующей поверхностью корпуса.

Закрепление платы к элементам корпуса можно осуществлять различными способами: приклеивкой, пайкой, механически с помощью винтов (рис. 3.36).

Приклеивка плат может осуществляться по нижней плоскости платы (рис. 3.36, а) или по периметру (рис. 3.36, б, в) сплошным или прерывистым швом. Обычно приклеивку по плоскости производят в тех случаях, когда обратная сторона платы не металлизирована.

Клей, используемый для приклеивки плат, должен удовлетворять следующим требованиям: склеивать металлы и диэлектрики; иметь величину относительной диэлектрической проницаемости, близкую к величине материала подложки, и минимальные потери; выдерживать температурные условия эксплуатации ГИС СВЧ; иметь приемлемые условия сушки (т. е. низкую температуру и малое время).

Приклеивка платы может осуществляться токопроводящим клеем, который используют также в случае необходимости осуществления электрической связи элементов с корпусом (рис. 3.36, в, г).

Достоинства применения клеевых составов по сравнению с пайкой связаны с относительно низкой темпе-

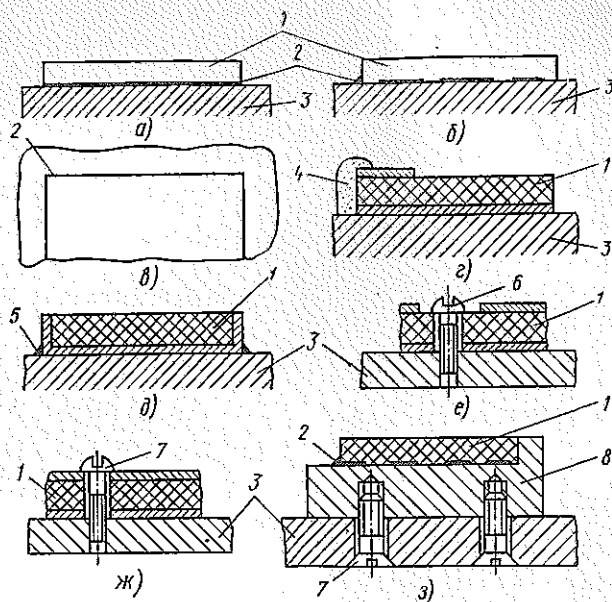


Рис. 3.36. Варианты крепления платы к корпусу ГИС СВЧ:

а — приклейка по плоскости платы; *б, в* — приклейка по торцу платы; *г* — приклейка токопроводящим клеем; *д* — пайка плат к основанию корпуса; *е* — механическое крепление платы при помощи диэлектрического винта; *ж* — то же, с использованием металлического винта; *з* — крепление платы с использованием вспомогательной пластины; *1* — плата; *2* — клеевой состав; *3* — основание корпуса; *4* — токопроводящий клей; *5* — припой; *6* — диэлектрический винт; *7* — металлический винт; *8* — вспомогательная пластина

ратурой, используемой для их отверждения. В этом случае не требуется использование флюсов и защитной атмосферы.

К недостаткам использования клея следует отнести необходимость тщательного проведения процесса нанесения клеевого состава для обеспечения однородности и равномерности, а также исключения пористости покрытия.

В табл. 3.13 приведены основные характеристики клеевых составов, которые могут быть использованы для приклейки плат к корпусу ГИС СВЧ.

Пайку платы к корпусу (рис. 3.36, *д*) применяют тогда, когда она имеет металлизированную обратную поверхность и торцы. Перед пайкой необходимо предварительно облудить соответствующие места в корпусе и на

Таблица 3.13

Марка клеявого состава	Относительная диэлектри- ческая проницаемость ϵ (при 20 °C; $f=10^3$ Гц)	Тангенс угла диэлектри- ческих потерь $\operatorname{tg} \delta \times 10^3$ (при 20 °C; $f=10^3$ Гц)	Удельное объемное электро- сопротивление, Ом см, при 20 °C	Условия отверждения			Температура эксплуатации, °C
				темпера- тура, °C	время, ч	удельное давление, кг/см ²	
ВК-9	4,6	1,0	—	20±5 65±5	24 1	0,1—2	—60 +125
K300-61	5,6	2,0	—	20±5 60 80	24—30 10 4	0,2—0,8	—60 +300
K-400	4,2	1,7	—	25±10 80	48 4	—	—60 +250
K-136	—	—	$5 \cdot 10^{-4}$	18—35 70±10	1 7	—	—60 +100

плате. Пайку производят паяльником с использованием низкотемпературных припоев.

Механическое крепление платы к корпусу можно осуществлять с помощью диэлектрического винта (рис. 3.36, *е*). Если необходимо «заземлить» элементы схемы, используют металлический винт (рис. 3.36, *ж*). Заземляющий винт должен быть коротким, так как при условии равенства его длины $\lambda/4$ схема становится разомкнутой относительно земли.

Если в ГИС СВЧ входит несколько плат, то для их крепления используют вспомогательную (несущую) пластину (рис. 3.36, *з*). Платы закрепляют на пластине путем припайки, приклейки или механическим способом с помощью винтов. Материал несущей пластины должен быть выбран таким образом, чтобы уменьшить тепловые напряжения в подложке и обеспечить рассеяние тепла.

Наличие в конструкции ГИС СВЧ вспомогательной несущей пластины позволяет в некоторых случаях облегчить сборку и настройку устройств, а также замену дефектных плат.

В качестве герметичных выводов СВЧ-энергии используют миниатюрный коаксиально-полосковый соединитель (рис. 3.37, а).

Коаксиально-полосковый СВЧ-соединитель должен иметь импеданс, близкий к импедансу микрополосковой линии, малые потери и малые габаритные размеры, быть герметичным (величина натекания не должна превышать $6,7 \cdot 10^{-8}$ л·Па/с) и выдерживать многократные изменения температур (от -60 до $+125^\circ\text{C}$); быть простым при изготовлении и присоединении.

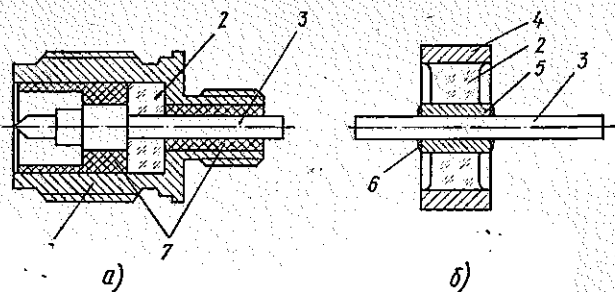


Рис. 3.37. Типовые элементы ввода энергии в герметичную ГИС СВЧ:

а — высокочастотный; б — низкочастотный: 1 — наружная резьбовая обойма; 2 — стеклянный изолятор; 3 — внутренний проводник; 4 — наружное кольцо; 5 — втулка; 6 — паяный герметичный шов; 7 — фторопластовые втулки

Для ввода низкочастотной энергии в ГИС СВЧ применяют конструкцию, показанную на рис. 3.37, б и представляющую собой стеклянную втулку 2, в которой имеется проволоочный коваровый проводник 3. Наружная обойма 4 после установки в соответствующее отверстие в корпусе ГИС СВЧ соединяется с корпусом методом пайки.

После установки и закрепления плат в корпусе ГИС СВЧ необходимо осуществить соединение их между собой и с вводами СВЧ и низкочастотной энергии. Обычно эти соединения осуществляют с использованием ленточных перемычек из золота или ковара, имеющего золотое покрытие. Толщина этих перемычек составляет 15—20 мкм, а ширина равна ширине проводника микрополосковой линии.

Ленточные перемычки соединяются с элементами схемы, СВЧ или низкочастотными вводами методами

сварки или пайки. Варианты соединений элементов ГИС СВЧ приведены на рис. 3.38. После установки, закрепления и соединения плат с СВЧ коаксиально-полосковым соединителем и низкочастотными выводами (если они имеются) и между собой проверяют работоспособность устройства и затем его герметизируют.

Наиболее распространенным методом герметизации является пайка крышки к корпусу. Применяя этот метод, легко провести разгерметизацию корпуса для выяснения причин возникновения неисправности. Кроме того, пайка позволяет соединять различные по форме и размеру детали ГИС СВЧ.

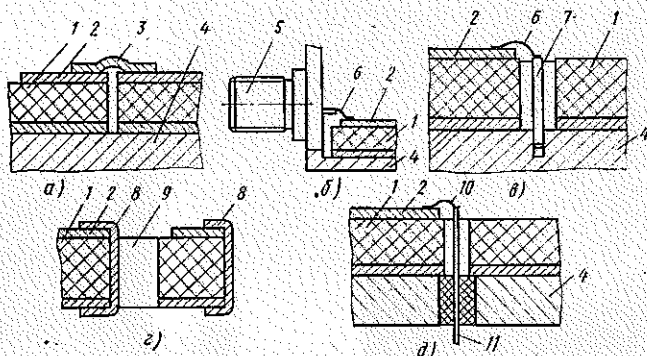


Рис. 3.38. Варианты соединений элементов ГИС СВЧ:

а — двух плат ленточной перемычкой; б — внутреннего проводника СВЧ коаксиально-полоскового соединителя с микрополосковой линией при помощи ленточной перемычки; в — пленочных элементов с корпусом через металлический штift; г — элементов при помощи тонкой ленты; д — элемента схемы при помощи проволоочной перемычки с низкочастотным вводом питания: 1 — плата; 2 — проводник МПЛ; 3 — ленточная перемычка; 4 — корпус; 5 — СВЧ коаксиально-полосковый соединитель; 6 — ленточная перемычка; 7 — металлический штift; 8 — ленточная перемычка; 9 — отверстие в плате; 10 — проволоочная перемычка; 11 — низкочастотный вывод

Конструкция герметизированной ГИС СВЧ приведена на рис. 3.39.

Для предотвращения проникновения газов, выделяющихся в процессе пайки крышки к корпусу, в его пазе устанавливается резиновая прокладка 4. Медная проволока 5 служит для удобства разгерметизации шва при необходимости ремонта.

В процессе пайки СВЧ-устройство нагревается до температуры расплавления припоя. Пайку обычно вы-

полняют мягкими припоями ПОС-40, ПОС-61 ПОСК-50-18, при использовании которых поверхность корпуса и крышки должны иметь серебряное покрытие. Между поверхностями сопрягаемых деталей, которые соединяются методом пайки, должен быть зазор 0,06-0,1 мм, а класс шероховатости поверхностей под пайку — не ниже 4—5.

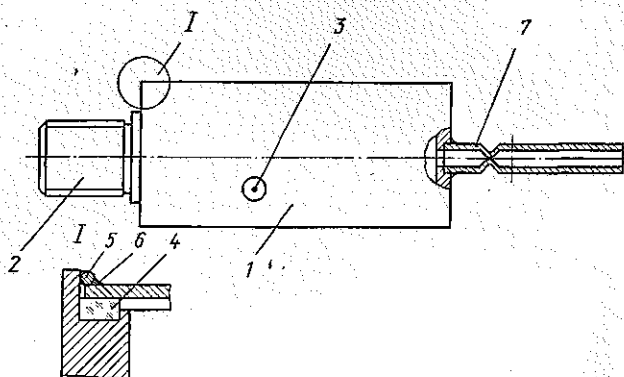


Рис. 3.39. Внешний вид гибридной интегральной схемы СВЧ:

1 — корпус; 2 — СВЧ коаксиально-полосковый соединитель; 3 — низкочастотный вывод; 4 — резиновая прокладка; 5 — медная проволока; 6 — припой; 7 — штуцер

Уравновешивание давления внутри и снаружи корпуса при охлаждении устройства происходит с помощью штуцера 7. Он служит для последующей проверки герметичности и заполнения внутренней полости инертным газом.

Проверка герметичности осуществляется при помощи гелиевого течеискателя. Для этого корпус через штуцер соединяется с вакуумной системой течеискателя, а шо обдувается струей гелия. При наличии неплотностей шве молекулы гелия попадают из внешней среды в корпус, а через штуцер и соответствующие коммуникации — в камеру измерительного прибора течеискателя, который регистрирует падение вакуума в системе.

Зная величину и скорость падения вакуума и объем устройства, определяют величину натекания. Величин допустимого натекания зависит от объема устройства, условий эксплуатации и составляет $1,33(10^{-6}-10^{-7})$

л. Па/с. Если протекание превышает допустимую величину, необходимо установить место утечки и провести дополнительную пайку.

После устранения дефектных мест и проверки работоспособности устройства из полости устройства откачивают воздух. Затем заполняют ее инертным газом (азотом, аргоном), создавая избыточное давление 1—1,2 ат. После этого осуществляют пережим медной трубки и ее герметизацию способом холодной сварки.

§ 3.3. Влияние технологических факторов на свойства пленочных элементов ГИС СВЧ

Технологический процесс изготовления пленочных элементов должен обеспечить заданные точность их геометрических размеров и определенные электрофизические параметры. Точность и электрофизические параметры пленочных элементов зависят от технологических методов и способов их изготовления и режимов отдельных операций.

Установленные технологическими инструкциями режимы изменяются в определенных границах в результате воздействия различного рода дестабилизирующих факторов, что приводит к изменению геометрических размеров и электрофизических свойств пленочных элементов. Знание характера и величин их изменений необходимо для оценки параметров пленочных элементов ГИС СВЧ.

Влияние параметров осаждения на электрические характеристики тонких пленок. Способ испарения или распыления исходного материала, а также технологические средства, используемые для его осуществления, определяют электрические характеристики пленочных элементов и стабильность их в условиях эксплуатации и хранения.

Состав и давление остаточного газа влияют на интенсивность процессов, происходящих в камере и на подложке. Чем выше давление, тем больше «чужеродных» молекул внедряется в структуру пленки, часть которых адсорбируется (поглощается) пленкой. Если молекулы химически активны (например, молекулы кислорода), то они вступают в химическое взаимодействие с осаждаемыми частицами металла. При любом изменении величины давления изменяется доля молекул остаточного газа,

«бомбардирующих» подложку, т. е. доля поглощенных или химически связанных атомов вещества, составляющих пленку.

Процесс осаждения и роста пленки в вакууме можно охарактеризовать k -фактором, представляющим собой отношение числа молекул остаточного газа (воздуха) $n_{ог}$, бомбардирующих подложку, к числу атомов вещества n_b , из которого формируется пленка, т. е.

$$k_{ос} = n_{ог}/n_b. \quad (3.14a)$$

Например, при напылении пленок со скоростью 100°Å/с при остаточном давлении $2,66 \cdot 10^{-4}$, $6,7 \cdot 10^{-2}$ и 4 Па величина k составляет 0,03; 7,4 и 440.

Отношение числа поглощенных молекул воздуха $n_{погл}$ к числу бомбардирующих поверхность подложки $n_{бомб}$ будет характеризовать поглощение. Коэффициент поглощения

$$k_{погл} = n_{погл}/n_{бомб}. \quad (3.14б)$$

Отношение числа химически связанных молекул активного газа $n_{св}$ к числу бомбардирующих поверхность подложки — коэффициент химической связи

$$k_{х.св} = n_{св}/n_{бомб}. \quad (3.14в)$$

Количество поглощенных молекул остаточного воздуха и химически связанных молекул вещества зависит от величины остаточного давления и времени осаждения пленки, а от этих характеристик зависят электрические свойства, которые «чувствительны» к различного рода «загрязнениям», вносимым в пленку в процессе ее роста.

Известно, что чем больше величина давления в камере, тем больше «дефектов» в виде поглощенных, внедренных или химически связанных молекул остаточного газа содержится в пленке, и следовательно, больше величина удельного сопротивления.

На графике рис. 3.40 приведена общая зависимость величины удельного сопротивления осажденных пленок от величины давления остаточного газа в камере.

В случае осаждения пленки при малой величине давления (около $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$) удельное сопротивление близко к величине для массивного образца. При ухудшении вакуума величина удельного сопротивления быстро увеличивается. На рис. 3.41 приведена модель струк-

р пленок, осажденных при различной величине вакуума.

Пленки, осажденные при высоком ($1,33 \cdot 10^{-4}$ Па) вакууме, имеют плотную, малодефектную структуру (рис. 3.41, а); при ухудшении вакуума (рис. 3.41, б) появляются «трещины» вдоль границ зерен, в которых адсорбируются молекулы остаточного газа; при еще более худшем вакууме (рис. 3.41, в) размеры трещин увеличиваются, являются внутренние поры. Пленки меди, осажденные в атмосфере аргона при давлении $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па, имеют величину удельного сопротивления на 50% выше по сравнению с пленками, осажденными в вакууме $33 \cdot 10^{-6}$ Па.

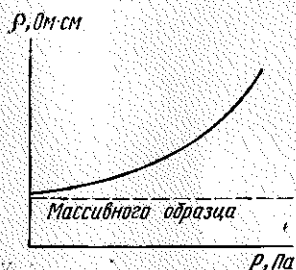


Рис. 3.40. Зависимость величины удельного сопротивления пленок от величины остаточного давления

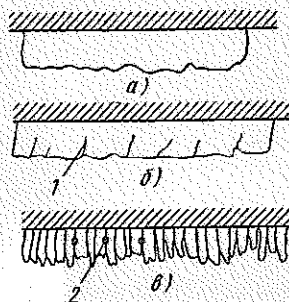


Рис. 3.41. Модель структуры осажденной пленки (а — при высоком; б — среднем; в — низком вакууме):

1 — трещина; 2 — пора

Поглощение в процессе осаждения пленкой меди молекул аргона увеличивает средний размер зерна (примерно на 20%) и приводит к возникновению дополнительных центров рассеяния электронов, что увеличивает удельное сопротивление.

При осаждении пленок веществ, способных вступать во взаимодействие с молекулами остаточного газа, важную роль играет не полное давление, регистрируемое вакуумметром, а парциальное давление наиболее «реактивных» газов, таких, как кислород, азот и пары воды.

При увеличении парциального давления «реактивных» газов электросопротивление пленок возрастает. Ха-

ракетер изменения сопротивления от величины парциального давления остаточного газа аналогичен приведенному на рис. 3.41. При химическом взаимодействии осаждаемой пленки с молекулами кислорода изменяются

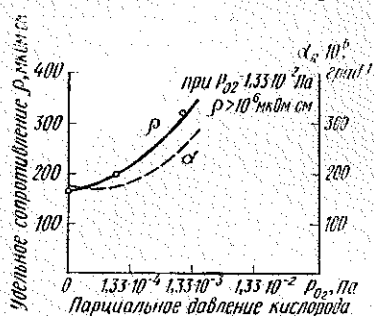


Рис. 3.42. Графики зависимости величины ρ и α пленок нихрома от величины парциального давления кислорода

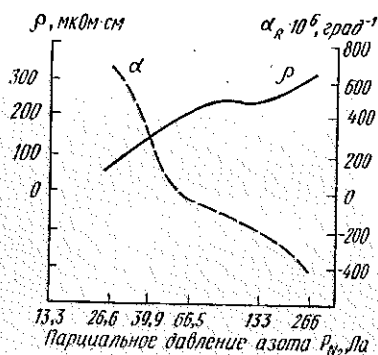


Рис. 3.43. Графики зависимости величины ρ и α пленок нитрида тантала от величины парциального давления азота

другие электрические характеристики, например величина ТКР.

На рис. 3.42 приведены графики зависимости величины сопротивления и ТКР пленок нихрома полученных в вакууме при различных парциальных давлениях кислорода. Изменение тех же характеристик пленок нитрида тантала от парциального давления азота приведено на рис. 3.43.

Скорость испарения от которой непосредственно зависит скорость осаждения пленок, также определяет электрические характеристики осаждаемой пленки. При увеличении скорости испарения увеличивается интенсивность потока пара, а следовательно, и доля частиц вещества по сравнению с бомбардирующим подложку молекулами остаточного газа [увеличивается показатель n_p формуле (3.14, а)]. С ростом скорости осаждения уменьшается размер критического зерна, создаются условия для образования сплошного слоя при меньшей его толщине. Изменяется также и микроструктура пленки: уменьшается размер зерна кристаллитов, а следовательно, и высота микронеровностей на поверхности пленки; уменьшаются также потери в микрополосковых линиях,

На рис. 3.44 дана кривая зависимости размера зерна медных пленок, осажженных при различных скоростях, а на рис. 3.45 — кривая затухания в микрополосковой линии с толщиной медного проводника 8 ± 1 мкм, полученного при различной скорости осаждения.

На рис. 3.46 приведен график, показывающий зависимость величины удельного сопротивления пленок хрома ρ_{Cr} от величины, характеризующей отношение скорости прибывания на подложку молекул остаточного газа (v_r) к скорости осаждения атомов хрома (v_{Cr}).

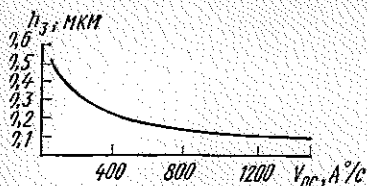


Рис. 3.44. Зависимость размера зерна (h_z) медных пленок от скорости осаждения (v_{Cr})

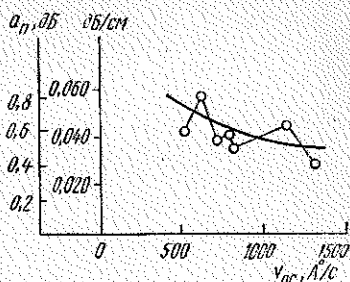


Рис. 3.45. Зависимость потерь в микрополосковой линии с медным проводником, осажженным при различной скорости

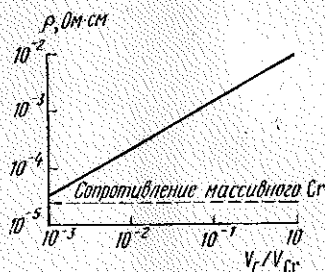


Рис. 3.46. График зависимости величины удельного сопротивления пленок хрома (ρ) от соотношения v_r/v_{Cr}

Зависимость имеет линейный характер, а величина удельного сопротивления пленок хрома — наименьшее значение, равное примерно $4 \cdot 10^{-5}$ Ом·см при отношении величины $v_r/v_{Cr} = 1/1000$, значительно большее значение $\rho_{Cr} = 10^{-2}$ Ом·см получено при равенстве величин $v_r/v_{Cr} = 1$.

На рис. 3.47 даны графики зависимости удельного поверхностного сопротивления, TKR и изменения сопротивления после отжига пленок нихрома, осажженных при различных скоростях.

Из графика видно, что с увеличением скорости осаждения снижается величина ρ ; величина TKR изменяется

от отрицательной до положительной, структура пленки становится менее стабильной: величина изменения сопротивления $\Delta R/R$ в результате отжига с ростом скорости осаждения возрастает.

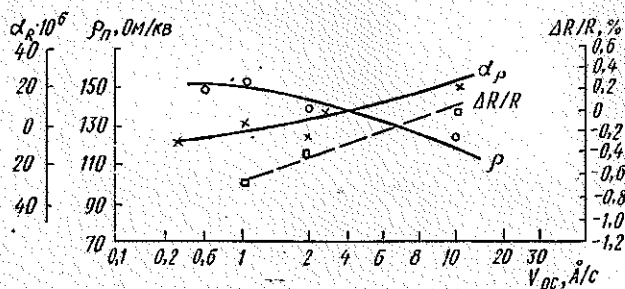


Рис. 3.47. Зависимость удельного сопротивления ρ , ТКР ($\alpha\rho$) и изменения сопротивления при отжиге ($\Delta R/R$) от скорости осаждения $v_{ос}$ пленок нихрома

Приведенные кривые на рис. 3.47 подтверждают общие положения о том, что с уменьшением скорости испарения увеличивается доля поглощенных молекул остаточного газа и молекул кислорода, вступивших в реакцию с материалом пленки и в результате величина ρ увеличивается, а величина ТКР становится более отрицательной; увеличение $\Delta R/R$ с увеличением скорости осаждения свидетельствует о формировании пленки с менее равновесной и стабильной структурой.

Последнее положение о влиянии скорости осаждения на стабильность электрических свойств подтверждают результаты, приведенные на рис. 3.48. Графики получены для пленок нихрома, осажденных на ситалловые подложки при скоростях осаждения $10 \text{ \AA}/\text{с}$ (кривая 1) и $1 \text{ \AA}/\text{с}$ (кривая 2) и прошедших климатические испытания на воздействие повышенной влажности (98% относительной влажности) и температуры ($+40^\circ\text{C}$) в течение двух суток.

Для сравнения на этом же рисунке приведена кривая 3 для пленок нихрома, осажденных со скоростью $3 \text{ \AA}/\text{с}$, но прошедших дополнительную стабилизирующую обработку на воздухе при температуре 150°C в течение 4 ч.

Изменение скорости при осаждении диэлектрических

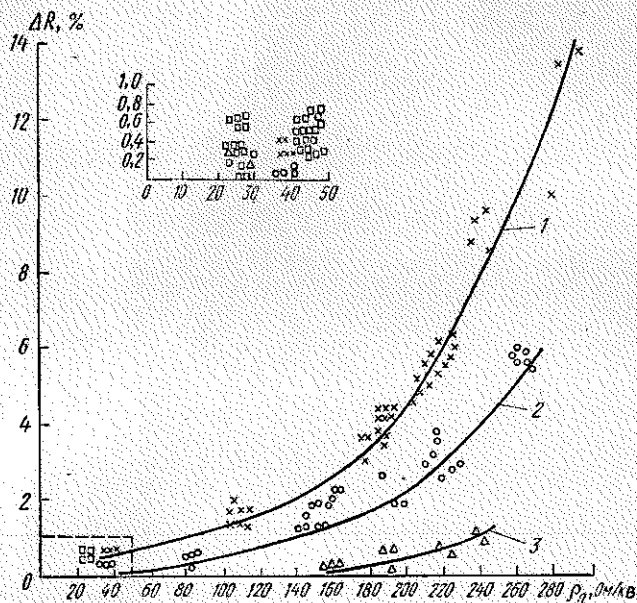


Рис. 3.48. Зависимость изменения сопротивления пленок никрома в результате климатических испытаний от скорости осаждения:

1 — 10 Å/с; 2 — 1 Å/с; 3 — 3 Å/с (стабилизированы на воздухе)

пленок влияет на их электрические характеристики (рис. 3.49).

Начиная с определенной величины скорости осаждения (для двуокиси кремния эта величина составляет примерно 200 Å/с), увеличивается ϵ , уменьшается $\operatorname{tg} \delta$ и величины $U_{\text{проб}}$. Увеличение $\operatorname{tg} \delta$ можно связать с изменением химической чистоты пленки. Ухудшение $\operatorname{tg} \delta$ и $U_{\text{проб}}$ объясняется тем, что конденсируемые частицы, занимая неидеальное и неравновесное положение на подложке, «закрываются» сверху вновь поступающими частицами — в результате структура диэлектрической пленки остается несовершенной.

Для пленок монооксида кремния существенное изменение величины ϵ сдвинуто в область скоростей осаждения до 50 Å/с. Пленки, полученные при низкой скорости осаждения (до 10 Å/с), имеют величину диэлектрической проницаемости, близкую к величине ϵ двуокиси

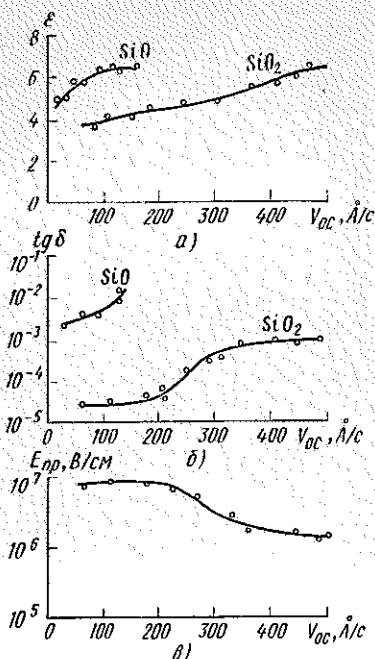


Рис. 3.49. Диэлектрические свойства пленок SiO_2 и SiO в зависимости от скорости осаждения: а — изменение диэлектрической проницаемости ϵ ; б — изменение тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$); в — изменение напряжения пробоя $E_{пр}$

можно объяснить появлением чистого кремния в осажденной пленке в результате термической диссоциации монооксида кремния, происходящей за счет повышенной температуры нагрева исходного вещества.

Изменение величины температурного коэффициента емкости конденсаторов с диэлектриком из монооксида кремния от скорости осаждения приведено на рис. 3.50. Как видно из рис. 3.50, величина ТКС для пленок, полученных с малой (3—5 $\text{\AA}/\text{c}$) и большой (свыше 60 $\text{\AA}/\text{c}$) скоростью осаждения, увеличена по сравнению с ТКС пленок, осажденных 20—30 $\text{\AA}/\text{c}$.

Температура подложки при осаждении имеет существенное значение для формирования структуры пленок.

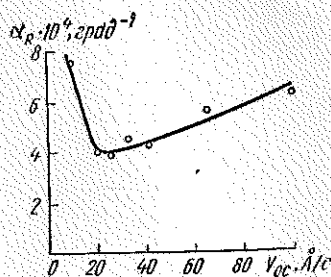


Рис. 3.50. Изменение величины ТКС пленочного конденсатора от скорости осаждения

кремния, что можно объяснить повышенным окислением монооксида кремния. Эти пленки содержат преимущественно SiO_2 .

С увеличением скорости осаждения свыше 15 и до 25 $\text{\AA}/\text{c}$ ϵ близка к 6 за счет уменьшения доли двуоксида кремния в осажденной пленке.

При скоростях осаждения более 50 $\text{\AA}/\text{c}$ ϵ приближается к 7, что

От нее зависит размер критического зерна: при увеличении температуры образуется меньшее число центров кристаллизации, а размеры самих зерен увеличиваются. В этом случае для получения сплошной пленки требуется большое количество осажденного вещества, т. е. большая толщина слоя.

С увеличением температуры подложки увеличивается вероятность упругого отражения атомов конденсируемых веществ, — в результате время осаждения увеличивается. Положительная роль повышенной температуры при осаждении пленок состоит в том, что конденсируемые атомы вещества приобретают дополнительную тепловую энергию, которая позволяет им занять наиболее равновесное состояние, т. е. пленки становятся более стабильными в эксплуатации.

На рис. 3.51 приведена диаграмма изменения сопротивления нихромовых резисторов ($\rho = 100 \text{ Ом/кв}$), осажденных на ситалловые подложки и прошедшие климатические испытания в течение двух суток при $+40^\circ \text{C}$ и относительной влажности 98%.

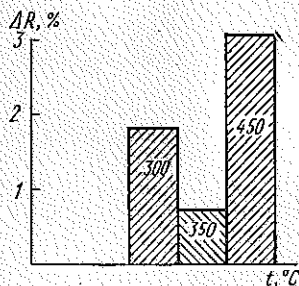


Рис. 3.51. Диаграмма относительного изменения сопротивления пленок нихрома, осажденных при различной температуре подложки, при климатических испытаниях

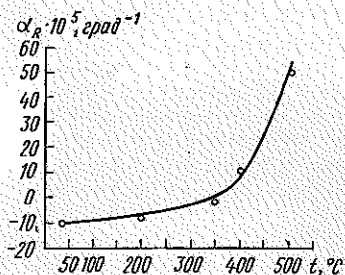


Рис. 3.52. Зависимость величины ТКР пленок MJT-3M от температуры подложки

Из результатов, данных на рисунке, видно, что оптимальная температура подложки при осаждении пленок нихрома около 350°C .

Зависимость величины ТКР пленок металлосилицидного сплава № 3 от температуры подложки, устанавливаемой в процессе осаждения пленок, приведена на

рис. 3.52. Из графика видно, что оптимальная величина температуры подложки, при которой $\alpha \approx 0$, 350°C .

Электрические характеристики: удельное сопротивление и ТКР пленок, полученных распылением в вакууме, зависят от величины напряжения, подаваемого на мишень. Наиболее изучены характеристики пленок тантала, полученных распылением в атмосфере азота.

На рис. 3.53 приведены графики зависимости величин ρ и α от напряжения распыления. На структуру и электрические свойства пленок при распылении влияет величина напряжения смещения, подаваемая на подложку.

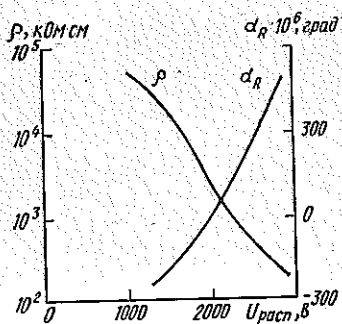


Рис. 3.53. Графики зависимости величины ρ и α_R пленок тантала, распыленных в аргоне при различных величинах напряжения

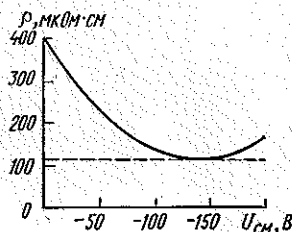


Рис. 3.54. Зависимость величины ρ от напряжения смещения на подложке

На графике рис. 3.54 приведена зависимость удельного сопротивления пленок нихрома от напряжения смещения. Напряжение, приложенное к подложке, является причиной, приводящей к бомбардировке поверхности осаждаемой пленки ионами, имеющими низкую энергию. Подобная бомбардировка способствует удалению примесей — в результате пленка становится более химически чистой, а сопротивление ее уменьшается. Оптимальной величиной напряжения смещения следует считать от -100 до -150 В , при котором величина ρ близка к величине массивного нихрома.

При осаждении веществ в вакууме необходимо обеспечить получение пленок с равновесной, упорядоченной структурой, содержащей минимальное количество структурных дефектов. Одним из таких процессов, позволяющих решить проблемы стабилизации структуры

свойств пленок, является *термическая обработка*. Степень влияния режимов термообработки на изменение электрических свойств тонких пленок зависит от материала пленки, условий ее осаждения и параметров термообработки.

На рис. 3.55, а, б приведены графики зависимости величины относительного изменения тангенса угла диэлект-

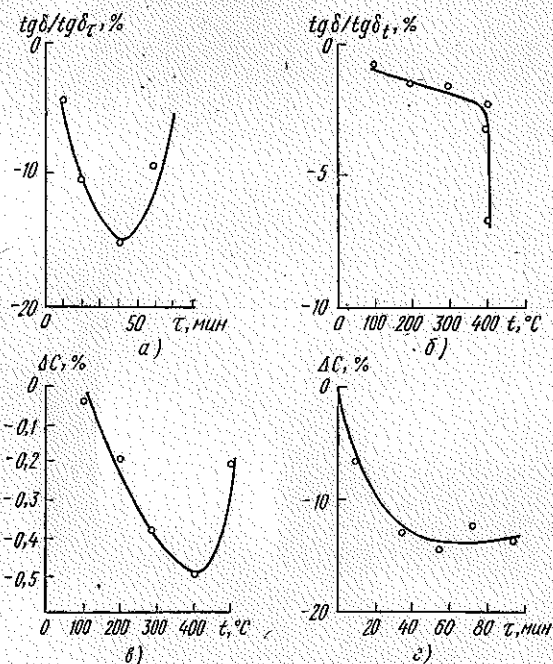


Рис. 3.55. Изменение электрических характеристик тонкопленочных конденсаторов с диэлектриком из SiO от параметров термообработки:

а — зависимость относительного изменения $tg\delta$ от времени термообработки; б — зависимость относительного изменения $tg\delta$ от температуры термообработки; в — изменение относительной величины емкости от температуры термообработки; г — изменение относительной величины емкости от времени термообработки

рических потерь конденсаторов с диэлектрическим слоем из монооксида кремния толщиной 1 мкм, осажденным со скоростью 30 Å/с, от времени термообработки (при температуре 400°C) и от температуры (при времени выдержки 45 мин) (рис. 3.55, а, б). Изменения $tg\delta$ могут

быть связаны с происходящими изменениями в структуре диэлектрической пленки и ее физических свойствах.

В результате термической обработки уменьшается величина начальной емкости конденсаторов (рис. 3.55, в, г); она зависит от температуры (для времени обработки 45 мин, рис. 3.55, в) и времени выдержки (для температуры 400° С, рис. 3.55, г); наибольшая величина уменьшения емкости происходит при температуре около 430° С.

Пленки, прошедшие термическую обработку, имеют лучшие эксплуатационные характеристики при испытаниях на влагоустойчивость (98% относительная влажность, температура +40° С). Сравнительные характеристики для пленок монооксида кремния и нихрома даны на рис. 3.56.

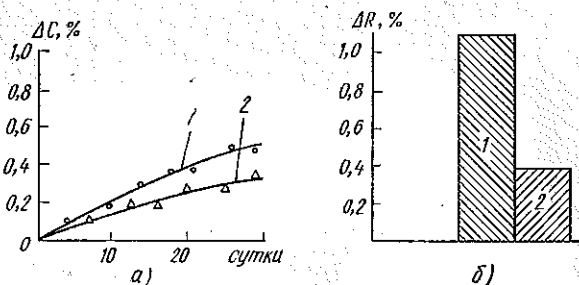


Рис. 3.56. Некоторые эксплуатационные характеристики диэлектрических и резистивных пленок, прошедших термическую обработку: а — изменение величины емкости пленочных конденсаторов с диэлектрическим слоем из SiO₂: 1 — без термообработки; 2 — термообработанные при 400° С в течение 45 мин; б — изменение величины сопротивления нихромовых резисторов ($\rho_{\text{н}}=120$ Ом/кв): 1 — без термообработки; 2 — с термообработкой на воздухе (+150° С, 2 ч)

Влияние некоторых параметров на характеристики толстопленочных элементов. Свойства толстопленочных проводников зависят от вида используемого функционального материала, процентного содержания стекла и плотности нанесенного слоя.

Зависимости величины потерь в пятидесятиной микрополосковой линии от указанных факторов приведены на рис. 3.57. Из рисунка видно, что чем больше в структуре проводника стеклофазы, тем больше величина потерь, которые также возрастают с уменьшением плотности пасты.

В настоящее время для создания резисторов в основном применяют серебряно-палладиевые пасты. В процессе вжигания в их составе происходят сложные превращения, приводящие к появлению кристаллических фаз окиси палладия и сплава палладия с серебром.

Воспроизводимость и стабильность электрических свойств серебряно-палладиевых резисторов зависит от полноты превращений, происходящих в его структуре, т. е. от соотношения Pd—Ag/PdO .

От свойств исходных паст зависит точность геометрических размеров толстопленочных элементов. При нанесении пасты в результате ее растекания по поверхности под-

ложки геометрические размеры элементов ГИС СВЧ имеют систематическую погрешность, зависящую от вида временного органического связующего и шероховатости поверхности подложки. На рис. 3.58 приведены данные по растеканию пасты ΔL на поверхности подложек из керамики 22ХС, имеющих класс чистоты шероховатости 7—8 (индекс А) и 11—12 (индекс Б) в зависимости от ширины проводника и вида органического связующего.

Температура и время вжигания резистивной пасты влияют на электрические характеристики: удельное сопротивление, TKR , э. д. с. шумов и стабильность резисторов. Характер и количественные показатели изменения электрических свойств зависят от вида, состава паст и режимов вжигания. На рис. 3.59 приведены зависимости удельного поверхностного сопротивления, TKR и стабиль-

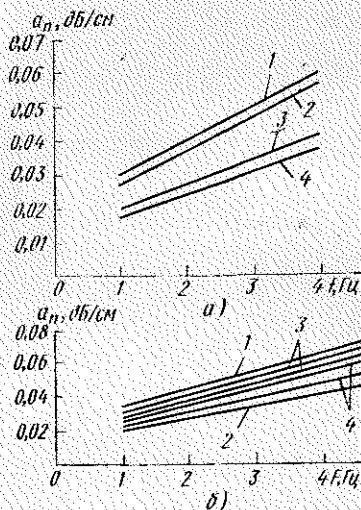


Рис. 3.57. Потери в толстопленочной микрополосковой линии в зависимости:

а — от вида наполнителя пасты: 1 — платина — серебро; 2 — золото; 3 — медь; 4 — напыленная структура хром — золото — медь; б — от содержания стеклофазы и плотности пасты: 1, 2 — повышенное и пониженное содержание стекла; 3, 4 — низкая и средняя плотность

ности резисторов на основе композиций серебро-палладий от температуры вжигания.

Влияние параметров фотолитографической обработки и электрохимического осаждения на точность геометрических размеров пленочных элементов. Если в процессе осаждения пленок формируются их физические свойства (электрическое сопротивление, диэлектрическая по-

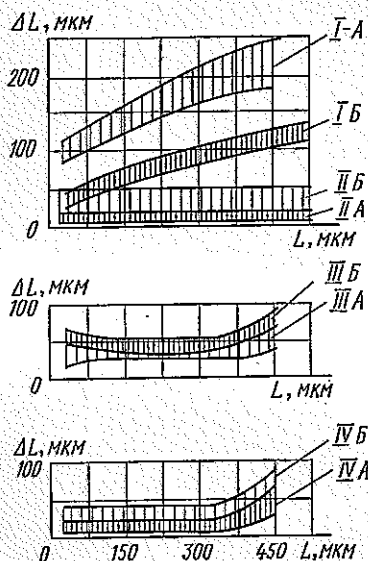


Рис. 3.58. Зависимость растекания проводящих паст при использовании различных органических связующих:

I — смесь ланолина и вазелина;
II — этилцеллюлоза; III — воск;
IV — смесь парафина и стеарина

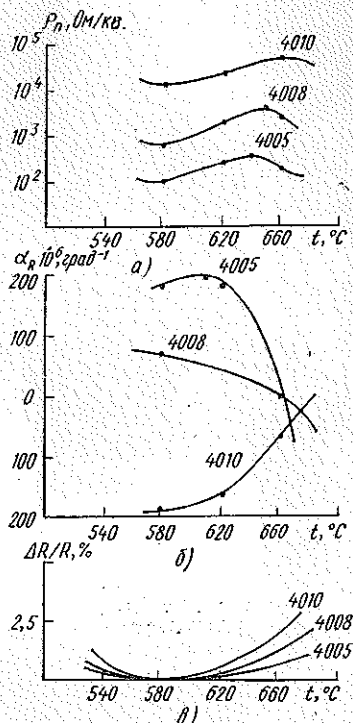


Рис. 3.59. Зависимость показателей характеристик толстопленочных резисторов, изготовленных из паст 4005, 4008 и 4010, от температуры вжигания:

a — удельного поверхностного сопротивления; б — ТКР; в — стабильности

стоянная, температурные коэффициенты сопротивления и емкости и т. д.), то процессы фотолитографической обработки, селективного травления определяют геометрические размеры пленочных элементов. В процессе электрохимического осаждения, используемого для утолщения

проводников микрополосковых линий, кроме изменения геометрических размеров элементов изменяются и электрические свойства.

Рассмотрим влияние некоторых дестабилизирующих факторов на точность получения размеров в фоторезистивном слое при контактной фотолитографии. От того, насколько точно получен размер элемента в фоторезистивном слое, зависят и размеры пленочных элементов при травлении или наращивании.

При передаче изображения на фоторезист возникают три вида погрешностей. К первому относятся погрешности, присущие фотошаблону: неточность размеров элементов, а также погрешности объективов, вызывающие искривление поля изображения и рисунка: астигматизм, дисторсия. Ко второму — ошибки искажения изображения за счет неплотного прилегания фотошаблона к поверхности подложки и дифракции; третий вид связан с операциями нанесения и обработки фоторезиста.

Контактная печать включает операцию *совмещения* фотошаблона с поверхностью подложки. В процессе совмещения возможны: неплотное прилегание фотошаблона к подложке, искривление поверхности фотошаблона или пластины, наличие неровностей на подложке, попадание частиц пыли, что приводит к образованию зазора между поверхностью фоторезиста и фотошаблона. Реальная величина зазора составляет 10—15 мкм. В результате появления зазора при экспонировании свет проникает под непрозрачные области фотошаблона и, рассеиваясь, создает расширение или сужение изображения на фоторезисте по сравнению с изображением на фотошаблоне.

На рис. 3.60 показана схема, показывающая изменение размеров элементов (a' и w') в слое негативного и позитивного фоторезистов при облучении через фотошаблон (a и w — размеры элементов на фотошаблоне), расположенный по отношению к поверхности фоторезиста с зазором (Δ).

Из рисунка видно, что наличие зазора при экспонировании негативного фоторезиста приводит к увеличению ширины «задубленных» участков, а следовательно, и размеров пленочных элементов, расположенных под ними. Экспонирование позитивного фоторезиста с зазором увеличивает незащищенные при экспонировании участки, удаляемые при проявлении.

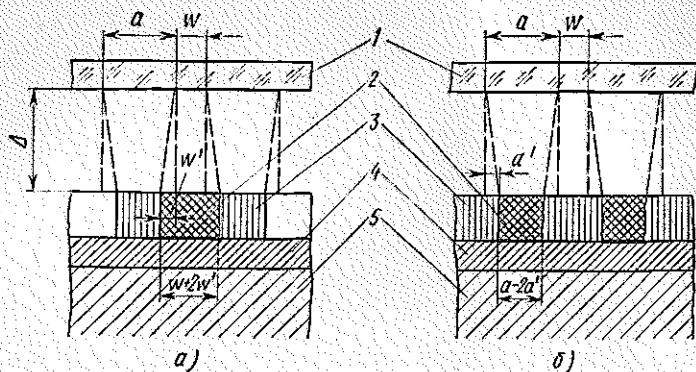


Рис. 3.60. Схема изменения размеров элементов на фоторезисте при экспонировании с зазором:

a — для негативного; b — для позитивного; 1 — фотошаблон; 2 — элемент на фоторезисте после проявления; 3 — участок фоторезиста, удаляемый при проявлении; 4 — осажденная пленочная структура; 5 — подложка

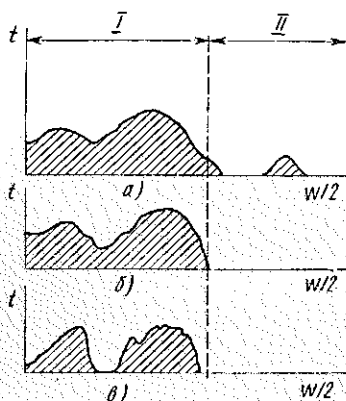


Рис. 3.61. Профили проявленного слоя позитивного фоторезиста, иллюстрирующие наличие «двойного края»:

a — малое время проявления; b — время проявления оптимально; c — большое время проявления; I, II — участки, затемненный и открытый при экспонировании

Наличие зазора между фотошаблоном и слоем фоторезиста обуславливает возникновение еще одного дефекта, так называемого «двойного края». Это связано с дифракционными явлениями. Определяющими факторами являются различия оптических характеристик темных и светлых участков на фотошаблоне и наличие границы их раздела.

На рис. 3.61 приведены профили проявленного слоя позитивного фоторезиста. При заниженном времени проявления (рис. 3.61, a) двойной край образуется в области засвеченных участков. С увеличением времени проявления образуются де-

фекты в области затемненных участков (рис. 3.61, c); при оптимальном времени (рис. 3.61, b) влияние этого дефекта минимально.

На точность воспроизведения геометрических размеров элементов в фоторезистивной маске влияют также параметры процесса обработки и экспонирования фоторезиста. Предварительная термическая обработка позитивного фоторезиста, проведенная при относительно низкой температуре ($80\text{--}90^\circ\text{C}$), приводит к увеличению ширины элементов фоторезиста; повышенная температура ($110\text{--}120^\circ\text{C}$) вызывает нежелательные превращения на краях фоторезистивной маски — в результате размеры элементов уменьшаются.

На рис. 3.62 приведен график зависимости отклонения геометрических размеров элементов в слое позитивного фоторезиста (прошедшего экспонирование и проявление при одинаковых условиях) от температуры предварительной термообработки.

Подложки, прошедшие термическую обработку при температурах, отличающихся от $t_{\text{опт}}$, будут иметь однородный характер изменения геометрических размеров. Эту ошибку можно устранить на последующих операциях травления или электролитического наращивания.

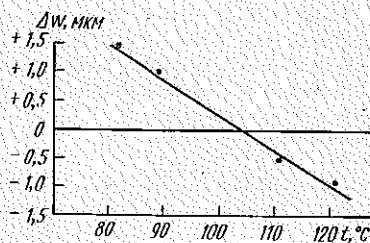


Рис. 3.62. Изменение геометрических размеров элементов фоторезистивного слоя Δw от температуры термообработки

Сложнее устранить ошибку, связанную с неравномерным распределением температуры по поверхности подложки. При этом изменение геометрических размеров фоторезистивной маски имеет неоднородный характер.

Печи, используемые для предварительной термообработки подложек с фоторезистивным слоем, должны иметь регулируемые источники тепла, позволяющие поддерживать температуру в пределах $\pm 2^\circ\text{C}$ с конвективным воздухообменом, обеспечивающим скорость движения воздуха с точностью $\pm 2\text{ мм/с}$.

Существенным фактором, определяющим геометрические размеры элементов в слое фоторезиста, является интенсивность световой энергии, поглощенной в процессе экспонирования. Факторы, которые определяют экспозицию (интенсивность света и время экспонирования), могут изменяться при экспонировании различных плат,

тогда будут меняться свойства подвергнутого облучению фоторезиста и размеры его элементов при последующих операциях обработки.

Увеличенная экспозиция, при которой поглощается избыточная световая энергия, приводит к разрушению «размерных» участков фоторезистивной маски. Недоста-

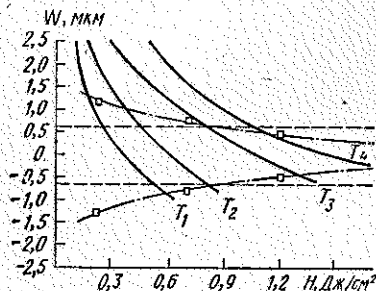
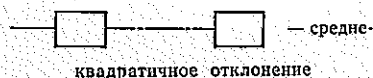


Рис. 3.63. Зависимость отклонений геометрических размеров элементов фоторезистивной маски W от энергии экспонирования H :

$T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ — температура предварительной термообработки; — — — поле допуска $\pm 0,5\%$;



точная экспозиция вызывает неполноту превращений в слое фоторезиста что также приводит к изменению размеров.

Зависимость размеров фоторезистивной маски от энергии экспонирования приведена на рис. 3.63. Ход кривых показывает что с увеличением энергии экспозиции отклонение размеров элементов фоторезистивной маски уменьшается, причем для каждой температуры термообработки имеется определенная величина энергии экспозиции, при которой отклонение размеров равно нулю. Из графиков также видно

что наиболее устойчивые результаты (наименьшее σ) получены для подложек, прошедших термическую обработку при более высокой температуре (T_4).

Для позитивного фоторезиста увеличенное время проявления вызывает уменьшение геометрических размеров, а недостаточное — их увеличение.

На рис. 3.64 приведены графики, характеризующие зависимость отклонения геометрических размеров элементов фоторезиста от времени проявления для различных концентраций раствора.

Анализ кривых R_1 — R_4 показывает, что отклонения геометрических размеров элементов в слое фоторезиста становится слабо зависимым от концентрации раствора и времени проявления с уменьшением концентрации растворителя. Используя разбавленные растворы для проявления фоторезиста, можно регулировать время проявления.

Выбор оптимальных параметров процесса проявления зависит от способа взаимодействия проявителя со слоем фоторезиста, находящемся на подложке. Скорость протекания процесса при подаче на подложку распыленной струи растворителя больше. В этом случае можно использовать менее концентрированные растворы, тем самым снизив необходимость строгого контроля времени проявления.

Достоинством растворов с малой концентрацией проявителя является однократность их использования, что повышает чистоту и качество обработки.

Изменение размеров и формы пленочных элементов происходит и в процессе химического травления. Развитие фронта травления слоя, находящегося под фоторезистом, можно представить в виде следующей модели.

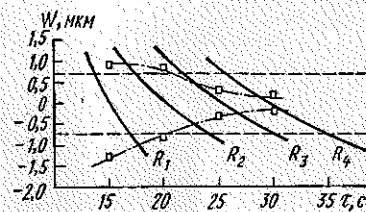


Рис. 3.64. Зависимость отклонений геометрических размеров элементов фоторезистивной маски w от времени проявления τ :

$R_1 > R_2 > R_3 > R_4$ — концентрация раствора; --- — поле допуска

$\pm 0,5\%$:

— среднее квадратичное отклонение

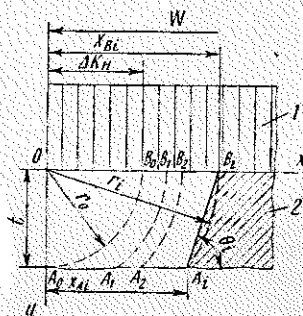


Рис. 3.65. Изменение размеров и формы проводника при травлении:

1 — слой фоторезиста; 2 — проводник МПЛ

Считая, что процесс травления протекает *изотропно*, фронт травления в сечении проводника, защищенного слоем фоторезиста (рис. 3.65), можно описать уравнением окружности с центром в точке O и радиусом r :

$$x^2 + y^2 = r_i^2. \quad (3.15)$$

При нормальном окончании травления величина бокового подтравливания верхней плоскости пленки Δk_n равна толщине пленки l .

При «передержке» времени травления граница подтравливания перемещается в направлении оси x , достигая по верхней плоскости точек $B_1, B_2, \dots, B_i$, а по нижней — точек $A_1, A_2, \dots, A_i$.

Величина подтравливания составляет:
для верхней плоскости

$$x_{B_i} = r_i,$$

для нижней плоскости

$$x_{A_i} = \sqrt{r_i^2 - t^2}. \quad (3.16)$$

Таким образом, при нормальном окончании процесса травления боковая грань проводника представляет собой поверхность цилиндра с радиусом $r_0 = t$.

Ширина проводника микрополосковой линии: для верхней плоскости $w_{\text{верх}} = w_{\text{фр}} - 2\Delta k_n$, для нижней $w_{\text{нижн}} = w_{\text{фр}}$, где $w_{\text{фр}}$ — ширина фоторезистивной маски.

Если процесс травления не окончен своевременно, происходит дальнейшее изменение размеров и формы проводника микрополосковой линии: уменьшаются размеры верхней и нижней плоскостей, увеличивается угол наклона боковой грани (θ).

В этом случае ширина проводника микрополосковой линии: для верхней плоскости $w_{\text{верх}} = w_{\text{фр}} - 2\Delta k_i$; для нижней $w_{\text{нижн}} = w_{\text{фр}} - \sqrt{r_i^2 - t^2}$.

Для устранения явления бокового подтравливания проводников МПЛ ГИС СВЧ вместо химического используют *ионное травление*, при котором ионы, бомбардирующие поверхность пленки (рис. 3.66), создают практически прямоугольный профиль элементов.

Скорость травления пленок находят по формуле (3.12) только для идеального случая. В действительности скорость травления осажденных пленок определяется структурой пленки, ее плотностью, концентрацией примесей, наличием внутренних напряжений. Если осажденная пленка является не монометаллической, а представляет собой сложное соединение или сплав нескольких компонентов, скорость травления зависит также от ее состава, а величина скорости травления — от условий осаждения пленки в вакууме.

На рис. 3.67 приведен график зависимости времени травления пленок нихрома, осажденных на поверхность

ситалла СТ-38, имеющего различную температуру подложки.

Как видно из графика, наименьшее время травления имеют пленки, осажденные на холодную ($\sim 25^\circ\text{C}$) подложку. По-видимому, эти пленки имеют «рыхлую» структуру слабо связанных между собой частиц спла-

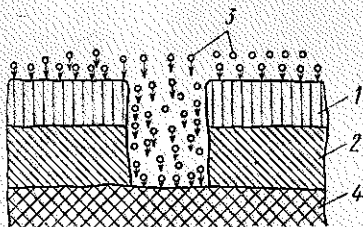


Рис. 3.66. Профиль элементов, полученных ионным травлением:

1 — фоторезист; 2 — пленка; 3 — ионы; 4 — подложка

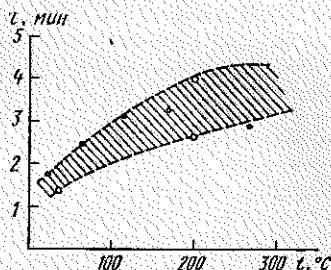


Рис. 3.67. Зависимость времени травления пленок никрома ($\rho_n=90 \text{ Ом/кв}$) от температуры подложки

ва. С повышением температуры структура пленки становится более упорядоченной, повышаются ее плотность и связь между составляющими частицами. Время травления такой структуры увеличивается.

В процессе формирования пленок легкоокисляющихся металлов, например хрома, происходит взаимодействие его частиц с молекулами остаточного газа — кислорода. В результате происходит изменение состава и скорости травления пленки.

На рис. 3.68 приведен график, показывающий изменение скорости травления осажденных пленок хрома в зависимости от глубины травления. На графике можно выделить три участка: А, В и С, свидетельствующие о различной скорости травле-

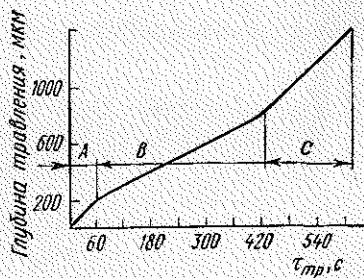


Рис. 3.68. Зависимость времени травления пленок хрома от глубины травления

ния слоя, которая обусловлена изменением состава осаждаемой пленки за счет окисления хрома.

Поверхностный слой *A* и слой, осаждающийся на подложку *C*, более насыщены кислородом; внутренний слой *B* является относительно чистым хромом. Окисленные слои, очевидно, имеют более рыхлую структуру, которая создает лучшие условия для проникновения травителя.

Процесс электрохимического осаждения, следующий за процессами фотолитографической обмотки или травления, влияет на изменение размеров и формы элементов. В процессе электрохимического осаждения происходят неравномерное осаждение слоя по поверхности подложки (в пределах 10—20%); увеличение ширины элементов; появление «усов» на краях пленочных элементов.

Ширина проводников и зазоров между ними влияет на равномерность осажденного слоя — проявляется эффект взаимного расположения проводников. Особенно действие этого эффекта заметно на проводниках, имеющих ширину до 50 мкм. При осаждении на проводники с шириной более 200 мкм характерно равномерное распределение осадка.

Способ присоединения токопровода к пленочным элементам и тип схемы оказывают влияние на равномерность осаждения слоя. Если слой осаждается на схему «позитивного» типа, токопровод присоединен к одному из элементов схемы, это вызывает неравномерное распределение тока и осадка на остальных элементах. При осаждении металла на схемы «негативного» типа все участки, на которые осаждается металл, объединены одним сплошным вакуумно-осажденным слоем меди.

На рис. 3.69 приведены кривые распределения металла на пленочных проводниках схемы при осаждении из пирофосфатного электролита для «позитивного» (1) и «негативного» (2) типов схемы.

Взаимосвязь изменения толщины и половины ширины проводника при электрохимическом осаждении меди в пирофосфатном электролите приведена на рис. 3.70. В связи с наличием большого числа дестабилизирующих факторов пропорциональная зависимость приращения толщины и ширины проводника имеет слабый характер.

На рис. 3.71 приведена профилограмма, снятая на профилографе—профилометре мод. «201» с пленочного проводника до и после операции электрохимического осаждения (рис. 3.71, а, б).

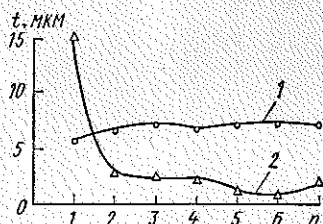


Рис. 3.69. Кривые распределения осадков меди на проводниках пленочной схемы для: 1 — негативного; 2 — «позитивного» типов схемы; n — порядковый номер проводника

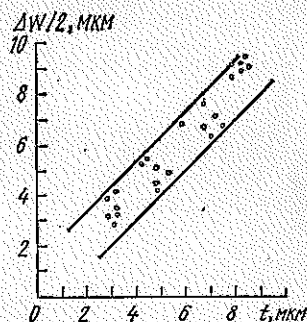
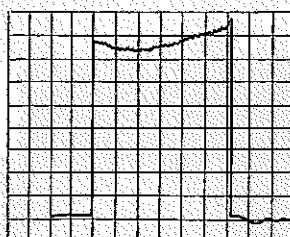


Рис. 3.70. Взаимосвязь изменения толщины (Δt) и половины ширины ($\Delta w/2$) проводника при электрохимическом осаждении



а)



б)



в)

Рис. 3.71. Профиль пленочных проводников:

а и б — тонкопленочного до и после электрохимического осаждения;
в — толстопленочного проводника

Профилограмма проводника, имеющего электролитически осажденный слой, демонстрирует эффект более интенсивного осаждения покрытия в углах проводника; для сравнения на рис. 3.71, в приведен профиль толсто пленочного проводника.

Процессы электрохимического осаждения и травления, используемые в производстве ГИС СВЧ, влияют

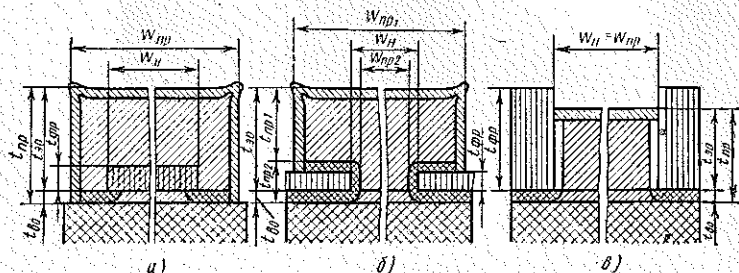
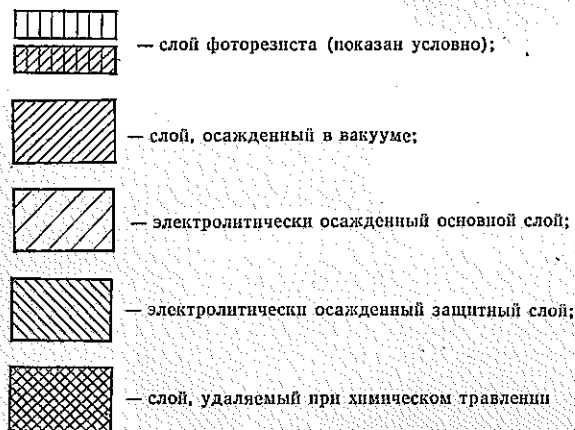


Рис. 3.72. Варианты формирования профиля проводника микрополосковой линии ГИС СВЧ:



на изменение геометрических размеров и формы элементов.

На рис. 3.72 приведена схема изменения профиля поперечного сечения проводника микрополосковой линии, изготовленного по трем вариантам технологического процесса. Характеристика этих вариантов приведена в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Характеристика или именованные параметры	Рис. 3.72, а	Рис. 3.72, б	Рис. 3.72, в
Последовательность технологических операций	Осаждение проводящего слоя в вакууме — нанесение и обработка фоторезиста — травление «нерабочих» участков — снятие фоторезиста с «рабочих» участков — электрохимическое осаждение	Осаждение проводящего слоя в вакууме — нанесение «окон» — электрохимическое осаждение — снятие фоторезиста с рабочих участков — травление «нерабочих» участков	Осаждение проводящего слоя в вакууме — нанесение и обработка фоторезиста (образование «окон») — электрохимическое осаждение — снятие фоторезиста с рабочих участков — травление «нерабочих» участков
Тип и толщина слоя фоторезиста $t_{фр}$, мкм	Позитивный около 1 мкм	Негативный около 1 мкм	Негативный $t_{фр} = t_{фр1} + 1 - 2$ мкм
Действительная ширина проводника, $w_{пр}$	$w_{пр} = w_H + 2t_{ф0}$	$w_{пр1} = w_H + 2t_{ф0}$ $w_{пр2} = w_H - 2t_{ф0}$	$w_{пр} = w_H$
Относительная погрешность ширины проводника $\Delta w_{отп} = \frac{ w_{пр} - w_H }{w_H} \cdot 100 (\%)$ (для следующих параметров: $w_H = 100$ мкм; $t_{фр} = 5$ мкм; $t_{ф0} = 1$ мкм; $t_{ф1} = 4$ мкм)	8	8	0

Из анализа рис. 3.72 и данных табл. 3.14 видно, что для достижения наибольшей точности ширины проводников следует использовать рис. 3.72, в, т.е. нанести «толстый» слой фоторезиста с последующим получением в нем «окон» и наращивания слоя в «окнах» фоторезиста. Таким образом, учет влияния технологических факторов на электрофизические свойства пленок и точность геометрических размеров элементов позволяет получать пленочные элементы ГИС СВЧ с различными параметрами.

При нестабильности режимов технологических операций эта зависимость приводит к разбросу параметров пленочных элементов ГИС СВЧ. Отклонения технологических режимов, а следовательно, и параметров пленочных элементов ГИС СВЧ от номинальных значений носят как систематический, так и случайный характер.

Систематические погрешности можно уменьшить за счет устранения или уменьшения влияния систематических дестабилизирующих факторов. Для уменьшения величины случайных отклонений требуется совершенствование технологического оборудования, создание автоматизированных средств управления технологическими операциями.

При разработке технологического процесса производства ГИС СВЧ вопрос о величине допустимых отклонений режимов отдельных операций является наиболее сложным и важным вопросом.

Его решение возможно лишь при совместном рассмотрении возможностей технологического процесса и технических требований, предъявляемых к объекту производства — ГИС СВЧ.

Глава 4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГИС СВЧ

§ 4.1. Общая характеристика

При любом технологическом процессе производства ГИС СВЧ ее элементы выполняются с некоторыми отклонениями. Это могут быть погрешности геометрии, микрогеометрии, формы, свойства материалов. По своей природе они случайны, так же как вызванные ими отклонения электрических параметров элементов ГИС СВЧ. Допустимая величина этого отклонения определяется границами поля допуска, которые задаются на этапе разработки.

Чем меньше производственные погрешности, тем меньше вероятность того, что в партии будут элементы ГИС СВЧ, электрические параметры которых находятся вне поля допуска, и тем меньше вероятность брака.

Технологическую себестоимость элемента ГИС СВЧ определяет точность изготовления, т.е. чем выше точность, тем выше себестоимость. При этом технологический процесс предполагается неизменным по своей структуре, а изменение точности обусловлено большей или меньшей стабильностью режимов, при которых выполняются отдельные его операции, концентрации обрабатывающих сред и т.д. С уменьшением точности изготовления (ростом производственных погрешностей) уменьшается технологическая себестоимость изготовления элементов ГИС СВЧ, но увеличивается брак, что приводит к росту себестоимости годных элементов ГИС СВЧ. Наилучшей с технологической точки зрения будет такая точность изготовления (технологический допуск), при которой технологическая себестоимость годного изделия минимальна.

Взаимосвязанный выбор номинальных параметров элементов конструкции и точности их изготовления позволяет найти условия, при которых технологическая себестоимость элементов ГИС СВЧ минимальна.

Выбор номинальных параметров элементов конструкции ГИС СВЧ и величины технологических допусков на них по критерию минимальной технологической себестоимости будем называть технологической оптимизацией конструкции ГИС СВЧ.

Часто на практике встает вопрос о том, каким технологическим процессом следует воспользоваться, если заданная конструкция ГИС СВЧ может быть выполнена различными технологическими методами. При условии, что эксплуатационные свойства ГИС СВЧ в сравниваемых случаях одинаковы, предпочтительным будет технологический процесс, для которого технологическая себестоимость минимальна.

При многономенклатурном производстве и малом объеме партий изменение точности изготовления для каждого типа ГИС СВЧ становится сложной задачей. Обычно технологический процесс стабилизируется и все типы ГИС СВЧ выполняют с одинаковой точностью, а затем разбраковывают. В этом случае технологическая оптимизация конструкций ГИС СВЧ ведется путем изменения номинальных параметров элементов конструкции по критерию максимальной вероятности выхода годных изделий.

Основой для проведения технологической оптимизации конструкций элементов ГИС СВЧ является функция распределения плотности вероятности параметра, по которому ведется оптимизация. Она может быть найдена на основе экспериментальных исследований, что трудоемко и требует изготовления большого количества образцов, или получена аналитически на основе предварительных исследований.

При устойчивом технологическом процессе математическое ожидание и дисперсия этой функции неизменны во времени, что облегчает технологическую оптимизацию. Если технологический процесс неустойчив, т.е. математическое ожидание и дисперсия зависят от времени (см. рис. 4.6), то пути технологической оптимизации параметров элементов конструкции ГИС СВЧ несколько изменяются при неизменном критерии — минимальной технологической себестоимости.

В начальный момент времени неустойчивый технологический процесс производства позволяет получить ГИС СВЧ с определенными допусками, от которых зависит ее технологическая себестоимость. С течением времени номинальные значения параметров конструкции изготавливаемых элементов ГИС СВЧ и точность реализации изменяются. Со временем эти изменения становятся столь значительными, что технологический процесс требует корректировки.

В условиях неустойчивого технологического процесса оптимизация предусматривает выбор значений номинальных параметров элементов конструкции ГИС СВЧ и технологических допусков в начальный момент времени, определение времени до очередной корректировки при известной ее трудоемкости. Критерием оптимизации является минимальная технологическая себестоимость элементов ГИС СВЧ.

При технологической оптимизации ГИС СВЧ в первую очередь следует решить вопрос о том, как, зная функции распределения плотности вероятности для электрических параметров элементов и ограничения, наложенные на них допусками, при заданной точности изготовления определить вероятность выхода годных ГИС СВЧ. При решении этого вопроса вероятность выхода годных рассматривается как условная, т.е. ГИС СВЧ будет годной при условии, что электрические параметры всех входящих в нее элементов находятся в пределах полей допусков.

Следует указать на место технологической оптимизации в общем процессе оптимизации СВЧ-устройств.

Задачи оптимизации качества изделий условно можно подразделить на два класса: задачи оптимизации *качества эксплуатируемых изделий* и *качества проектируемых изделий*, т.е. задачи оптимального синтеза, которые делятся на задачи структурной и параметрической оптимизации. При *структурной* оптимизации выбирают оптимальную структуру изделия, при *параметрической* определяют оптимальные электрические параметры, для которых находятся наилучшие с точки зрения функционирования соотношения конструктивных параметров в предположении, что все они номинальны. Затем определяется допустимый разброс электрических и соответствующий им разброс конструктивных параметров (конструкторские допуски), гарантирующий

попадание электрических параметров в пределы пол допусков при любой комбинации отклонений конструкционных параметров.

При технологической оптимизации с учетом закон распределения производственных погрешностей определяют такое соотношение номинальных конструкционных параметров и требуемой их точности (технологических допусков), при котором технологическая себестоимость ГИС СВЧ минимальна. Показателем годности является нахождение электрических параметров ГИС СВЧ в пределах полей допусков. Полученные в критерию минимальной технологической себестоимости номинальные конструкционные параметры технологические допуски на них могут отличаться от значений параметров и конструкторских допусков полученных при параметрической оптимизации. Технологическая оптимизация является одним из факторов повышения эффективности производства ГИС СВЧ

§ 4.2. Технологическая оптимизация при устойчивом процессе производства

Целью технологической оптимизации параметров конструкций ГИС СВЧ является минимальная технологическая себестоимость годных изделий. Пути достижения этой цели зависят от накладываемых ограничений

1) *оптимизация проводится в рамках сложившегося технологического процесса, который не подлежит изменению*: не могут быть изменены параметры законов распределения погрешностей элементов конструкции и оптимизация ведется путем корректировки номинальных значений конструкционных параметров по критерию максимальной вероятности выхода годных изделий: при этом достигается лишь локальный минимум технологической себестоимости;

2) *при оптимизации допустимо изменение точности конкретного технологического процесса и использовании других технологических процессов, позволяющих получить заданную конструкцию*; оптимизация ведется путем изменения допустимых величин технологических погрешностей и корректировки номинальных параметров элементов конструкции по критерию минимальной себестоимости годных изделий. При этом можно дос

игнуть абсолютного минимума технологической себестоимости.

Рассмотрим пути выполнения технологической оптимизации параметров конструкции ГИС СВЧ для полоскового элемента*, имеющего один обобщающий электрический параметр, по которому определяется его годность. Под обобщающим понимается электрический параметр, связанный со всеми электрическими параметрами полоскового элемента. Часто таким параметром является волновое сопротивление. Пусть для полоскового элемента y — это обобщающий электрический параметр. Границы поля допуска на него обозначим через a и b . Поле допуска будем рассматривать равноценным во всех точках, а годными считать все элементы с параметрами, попавшими в поле допуска.

Любой устойчивый технологический процесс производства элементов ГИС СВЧ характеризуется своей совокупностью (системой) погрешностей конструктивных параметров и определенными вероятностными характеристиками функции их распределения. При неизменной структуре технологического процесса с изменением точности выполнения технологических операций в определенных пределах меняется и точность конструктивных параметров изготавливаемой ГИС СВЧ.

Разброс конструктивных параметров обуславливает разброс обобщающего электрического параметра полоскового элемента. Пусть $W(y)$ — функция распределения плотности вероятности обобщающего электрического параметра, полученная с учетом функциональных особенностей полоскового элемента на основе зависимостей, связывающих его электрические и конструктивные параметры.

Вероятность выхода годных полосковых элементов

$$P_r(y) = \int_a^b W(y) dy. \quad (4.1)$$

Требуется получить $P_r(y) \rightarrow \max$. Решать эту задачу можно двумя путями: 1) не изменяя системы и величины производственных погрешностей, можно найти

* По ГОСТ 21702—76 полосковый элемент — конструктивно неделимая часть полоскового узла, являющаяся элементом с определенными параметрами принципиальной электрической схемы полоскового узла.

такие номинальные параметры конструкции, чтобы площадь кривой распределения $W(y)$ в пределах поля допуска была максимальной; 2) путем корректировки технологического процесса изменить систему или величину погрешностей с последующим выбором новых номинальных параметров конструкции полоскового элемента.

В первом случае необходимо определить оптимальные номинальные параметры конструкций ГИС СВЧ.

Учитывая зависимости выходного электрического параметра от конструктивных параметров, можно записать из (4.1), что вероятность выхода годных

$$P_T(y) = \underbrace{\int \dots \int}_B W(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, dx_2, \dots, dx_n. \quad (4.2)$$

В (4.2) B — область допустимых значений изменения конструктивных параметров, при которых выходной электрический параметр будет находиться в пределах поля допуска (определяется конструкторскими допусками, полученными при параметрической оптимизации).

Функцию $P_T(y)$ требуется исследовать на максимум. Для этого достаточно взять первые производные от нее по всем переменным, приравнять их нулю и, решая систему полученных уравнений, найти значения $x_1, x_2, \dots, x_n$, при которых будут выполняться условия экстремальности*. Учитывая, что конструктивные параметры и величины их отклонений заданы количественно, дифференцирование произведем по дополнительной переменной Δx_j , величину которой и будем определять:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial(\Delta x_1)} \int_{\min x_1}^{\max x_1} dx_1 \dots \int_{\min x_n}^{\max x_n} W(x_1 + \Delta x_1), \dots, (x_n + \Delta x_n) dx_n &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial(\Delta x_n)} \int_{\min x_1}^{\max x_1} dx_1 \dots \int_{\min x_n}^{\max x_n} W(x_1 + \Delta x_1), \dots, (x_n + \Delta x_n) dx_1, \dots, dx_n &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

* Подынтегральная функция предполагается дифференцируемой

Определив новые номинальные значения конструкционных параметров $(x_j + \Delta x_j)$, смещают и деформируют кривую распределения плотности вероятности электрического параметра с таким расчетом, чтобы площадь ее в пределах поля допуска была максимальной. Следовательно, для конкретной системы и величины погрешностей существуют номинальные параметры конструкции, при которых вероятность выхода годных по электрическому параметру изделий максимальна. В качестве иллюстрации на рис. 4.1 дан пример оптимизации конструкционных параметров отрезка микрополосковой линии по критерию максимальной вероятности выхода годных. Кривая 1 — кривая распределения плотности вероятности волнового сопротивления микрополосковой линии (подробно вывод аналитического выражения приведен в гл. 5), имеющей $h=1$ мм; $w/h=0,8$, выполненной на подложке из керамики 22ХС при нерегулярных погрешностях $\sigma_{\text{эфф}}=0,1$. При расчете номинальной ширины микрополоскового проводника на $Z_0=50$ Ом и допуске $\pm 5\%$ возможен значительный брак. Корректировка ширины полоскового проводника $\Delta w=0,028$ мм позволяет при той же погрешности $\sigma_{\text{эфф}}$ свести брак к минимуму (кривая 2). При этом положение границ поля допуска на волновое сопротивление не изменяется.

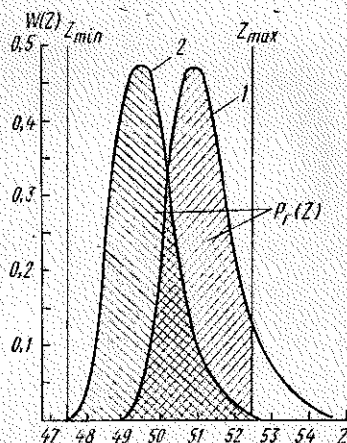


Рис. 4.1. Распределение плотности вероятности волнового сопротивления для 50-омной микрополосковой линии до коррекции (кривая 1) и после нее (кривая 2)

Для каждой системы и величины технологических погрешностей конструкционных параметров значения оптимальных номинальных параметров конструкции будут своими, присущими только этой системе.

Дальнейшее увеличение вероятности выхода годных элементов ГИС СВЧ возможно путем изменения величины погрешностей. Это достигается или корректиров-

кой выбранного технологического процесса, или выбором нового технологического процесса. Определяющим критерием целесообразности является технологическая себестоимость. Ее величина зависит от технологических допусков, с которыми изготавливается элемент ГИС СВЧ.

Экспериментальные исследования показывают, что в функции точности размеров топологии технологическую себестоимость изготовления партии полосковых элементов, при условии, что каждый элемент расположен на отдельной подложке, можно записать в следующем виде:

$$S_T = M\sigma_\omega^N, \quad (4.4)$$

где значения M и N постоянны для данного технологического процесса и условий его проведения; σ — среднее квадратическое отклонение размеров топологии.

Выражение (4.4) может быть использовано лишь в предположении, что структура технологического процесса не изменяется, а точность размеров топологии меняется за счет изменения точности выполнения отдельных технологических операций (например, точности поддержания режимов, состава обрабатывающих сред и т. д.).

Технологическая себестоимость годного изделия при невозстанавливаемом браке

$$C_T = S_T/\beta, \quad (4.5)$$

где β — число годных изделий в партии.

Качественно зависимость технологической себестоимости годного изделия от точности изготовления показана на следующем примере.

При уменьшении точности, с которой изготавливается топология полоскового элемента, с одной стороны, уменьшается технологическая себестоимость S_T (кривая 1, рис. 4.2), с другой — появляется брак, стоимость которого растет с увеличением количества N бракованных изделий (кривая 2). В результате технологическая себестоимость годного изделия C_T изменяется так, как показано кривой 3, т. е. имеет при некоторой точности изготовления топологии σ_2 минимум. При этом предполагается, что для каждого значения σ номинальные параметры полоскового элемента оптимальны, т. е. до-

стигается максимальная вероятность выхода годных изделий.

Определить условия минимума технологической себестоимости, как функции точности, при большом количестве конструкционных параметров достаточно сложно. На практике возможны случаи, когда функцию не удастся записать, а зависимость технологической себестоимости от точности описывается с помощью статистических моделей. Учитывая характер функции и тот факт, что требуется определить условия, при которых технологическая себестоимость имеет абсолютный (нелокальный) минимум, для нахождения этих условий целесообразно использовать методы случайного поиска. Эти методы подробно рассматриваются в других дисциплинах специальности, здесь дадим лишь краткое их описание.

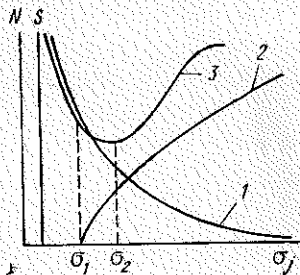


Рис. 4.2. Зависимость технологической себестоимости от точности изготовления

Пусть необходимо найти минимум функции $C_T(\sigma)$, где $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]$ — некоторый n -мерный вектор, однозначно определяющий значение функции. Введем описание единичного случайного n -мерного вектора $\bar{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]$, отдельные реализации которого равновероятно распределены во всем n -мерном пространстве. Компоненты этого вектора удовлетворяют условию $-1 \leq \varepsilon_i \leq 1$ при $i = 1, 2, \dots, n$, и нормированы в квадратичном смысле

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = 1.$$

Различают следующие основные методы случайного поиска: слепой, простой последовательный и адаптивный последовательный. При слепом поиске на каждом шаге поиска за n -мерный вектор переменных принимается вектор $\sigma_m = k \bar{\varepsilon}_m$, где k — масштабный коэффициент, определяемый возможными изменениями вектора σ ; m — номер шага поиска. Компоненты вектора $\bar{\varepsilon}_m$ при слепом поиске могут принимать произвольные случайные значения.

При простом последовательном поиске случайный вектор ε_m формируется с учетом информации о поведении функции $C(\sigma)$ на $(m-1)$ -м шаге.

Адаптивный последовательный поиск отличается от простого тем, что случайный вектор ε_m формируется с учетом информации о поведении функции $C_T(\sigma)$ на протяжении всех предыдущих шагов. Эта информация используется для двух преобразований: 1) изменения вероятностных характеристик, определяющих направление случайного вектора ε в пространстве n переменных; 2) изменения масштабного коэффициента k .

В адаптивных алгоритмах вводится вектор памяти $\bar{P}_m$, вычисляемый на каждом шаге поиска по рекуррентным соотношениям. Изменение масштабного коэффициента связывается функционально с некоторой характеристикой λ_m , отражающей степень приближения значения функции $C_T(\sigma_{m-1})$ к минимуму.

В общем виде

$$\bar{\sigma}_m = a_m \bar{n}_m,$$

где a_m — измененный масштабный коэффициент; $n_m = \varphi(\varepsilon, P_m)$ — измененный случайный вектор.

Для практических расчетов обычно используются зависимости $\lambda_m = (m-1)/d$; $a_m = a_0/\lambda_m^r$, где r — показатель степени, зависящий от вида функции $C(\sigma)$, $r=1-3$; $(m-1)$ — общее число шагов поиска; d — число удачных шагов поиска.

Кроме того, в любой алгоритм последовательного случайного поиска вводится условие окончания процесса вычислений (например, задается λ_m). Опыт показал, что удовлетворительная точность определения минимума (порядка 1%) достигается при $\lambda_m = 5 \div 10$. Определив условия глобального минимума функции $C(\sigma)$ для заданного интервала $y = y_0 \pm \Delta y$, получим систему технологических погрешностей $\sigma_1 \dots \sigma_n$, оптимальную для данного технологического процесса и конкретной конструкции элемента ГИС СВЧ. Сравнивая несколько технологических процессов, можно охарактеризовать их функциями технологической себестоимости от точности (кривые 1, 2, 3, рис. 4.3). Кривая 4 показывает взаимосвязь точности электрического параметра и его оптимального номинального значения y_0 . В случае, показанном на

рис. 4.3, минимальная технологическая себестоимость будет при $\sigma_j = \sigma'_j$ и номинальном значении электрического параметра y'_0 (кривая 2).

Полосковый элемент функционирует в составе полоскового узла. В этом случае при технологической оптимизации показателем годности становится уже не только выходной или входной электрический параметр (как ранее), а взаимное соотношение электрических параметров стыкуемых элементов ГИС СВЧ.

Рассмотрим метод выполнения технологической оптимизации двух стыкуемых элементов ГИС СВЧ при заданном КСВН в области стыковки, когда ограничения накладываются на волновые сопротивления стыкуемых элементов.

Погрешности параметров конструкции приводят к тому, что для каждого полоскового элемента волновое сопротивление становится категорией вероятностной. В случае разброса конструктивных параметров вероятность согласования полосковых элементов следует рассматривать по допустимому уровню КСВН. Условие, что коэффициент отражения от области соединения полосковых элементов не превышает некоторой заданной величины, накладывает ограничения на величины их волновых сопротивлений. Вероятность того, что будут выполнены условия согласования, представляет собой вероятность совместного наступления событий $Z_2 = Z_1 \pm \pm \delta Z_1$ и $Z_1 = Z_2 \pm \pm \delta Z_2$ (Z_1 и Z_2 — волновое сопротивление стыкуемых полосковых элементов). Если эти события зависимы, она равна произведению вероятности первого из них (Z_1) на условную вероятность второго (Z_2), вычисленную в предположении, что первое событие произошло. Если события независимы, то вероятность совместного их наступления будет равна произведению вероятностей этих событий:

$$P(\Gamma \leq \Gamma_{\max}) = \int_{s'} \int W(Z_1) W(Z_2) dZ_1 dZ_2, \quad (4.6)$$

где $W(Z_1)$ и $W(Z_2)$ — функции распределения плотности

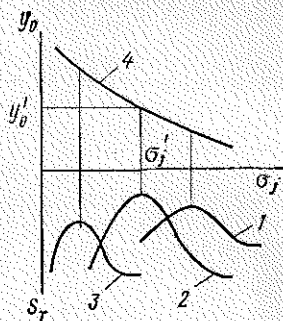


Рис. 4.3. Взаимосвязь оптимума номинала и технологической себестоимости

вероятности волнового сопротивления первого и второго стыкуемых элементов ГИС СВЧ (рис. 4.4, а).

s' — область, где выполняются условия согласования — коэффициент отражения в месте соединения полосковых элементов не превышает максимально допустимое значение $\Gamma \leq \Gamma_{\max}$.

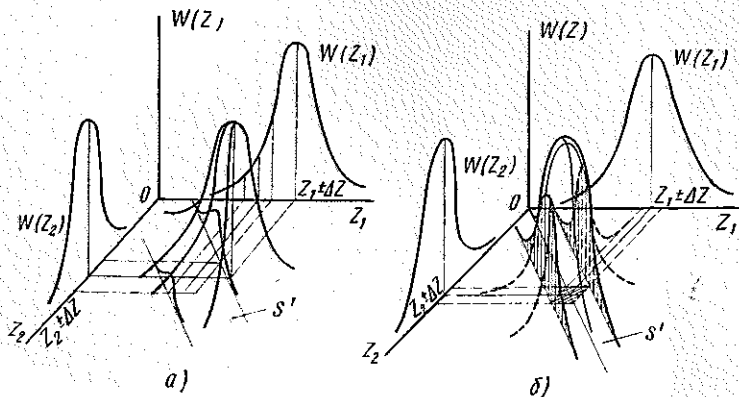


Рис. 4.4. Вероятность годности при соединении элементов ГИС СВЧ со случайными параметрами

Локальный максимум значения $P(\Gamma \leq \Gamma_{\max})$ для случая, когда технологический процесс не подлежит корректировке, можно найти по методике, аналогичной используемой для (4.1) путем выбора оптимальных значений Z_1 и Z_2 . На рис. 4.4 это соответствует выбору такого взаимного расположения кривых распределения плотности вероятности $W(Z_1)$ и $W(Z_2)$, что вероятность выхода годных (объем над областью работоспособности s') стала бы максимальной (рис. 4.4, б). Смещение и деформация этих кривых возможны корректировкой номинальных значений Z_1 и Z_2 .

Для определения оптимальных номинальных значений Z_1 и Z_2 следует решить систему уравнений:

$$\frac{\partial}{\partial (\Delta Z_1)} \iint_{s'} W(Z_1 + \Delta Z_1) W(Z_2 + \Delta Z_2) dZ_1 dZ_2 = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial (\Delta Z_2)} \iint_{s'} W(Z_1 + \Delta Z_1) W(Z_2 + \Delta Z_2) dZ_1 dZ_2 = 0,$$

которая решается относительно неизвестных ΔZ_1 и ΔZ_2 . Найденные значения определяют смещения математических ожиданий функций распределения плотности вероятности волновых сопротивлений стыкуемых полосковых элементов, при которых вероятность годности будет максимальной.

От значений ΔZ_1 и ΔZ_2 нетрудно перейти к корректировке номинальных размеров, зная аналитические выражения, использованные при параметрическом синтезе, и характеризующие связь электрических и конструктивных параметров. При малых ΔZ_1 и ΔZ_2 , что имеет место на практике, для нахождения соответствующих изменений номинальных параметров конструкций элементов ГИС СВЧ можно использовать метод разложения в ряд Тейлора. Разложение функции, связывающей электрический параметр с параметрами конструкции, производят, рассматривая в качестве переменных конструктивные параметры. Обычно при рассмотрении пренебрегают частными производными второго порядка и выше. Тогда полное приращение функции примет вид:

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial x} (x_1 - x_{10}) + \dots + \frac{\partial Z}{\partial x_i} (x_i - x_{i0}) + \\ + \frac{\partial Z}{\partial x_N} (x_N - x_{N0}).$$

Обозначив $\Delta x_i = x_i - x_{i0}$, данное соотношение можно переписать в виде

$$\Delta Z = \sum_{i=1}^N \frac{\partial y}{\partial x_i} \Delta x_i.$$

Значение $\partial Z / \partial x_i$ принято называть абсолютной чувствительностью, а Δx_i — абсолютным отклонением параметра конструкции, под N подразумевается общее число анализируемых параметров конструкции, рассматриваемых как переменные. Изменяя величины Δx_i , можно найти, при каких их значениях будет получено требуемое изменение ΔZ . Пример использования данной методики технологической оптимизации стыкуемых полосковых элементов рассмотрен в § 6.6.

Если при технологической оптимизации допустимо изменение системы и величины технологических погрешно-

стей конструкции стыкуемых полосковых элементов, то при их расположении на общей подложке технологическая себестоимость S_T может быть рассчитана, как и в формуле (4.4). Это обусловлено групповой технологией производства ГИС СВЧ. При расчете технологической себестоимости годных по критерию согласования стыкуемых полосковых элементов максимальную величину β в выражении (4.5) надо определять из (4.6). Поиски условий глобального минимума проводятся так же, как и для одиночного полоскового элемента.

§ 4.3. Технологическая оптимизация при неустойчивом процессе производства

В ряде случаев технологический процесс не может быть полностью устойчивым, потому что с течением времени в нем появляются систематические погрешности, вызванные изменением параметров оборудования и обрабатывающих сред.

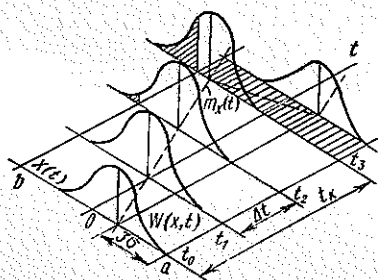


Рис. 4.5. Смещение распределений плотности вероятности при неустойчивом технологическом процессе

Если представить такой технологический процесс как сложную систему, состояние которой характеризуется распределением показателя качества, то можно сделать вывод, что состояние этой стохастической системы есть функция времени.

При этом в общем случае

изменяются и положение математического ожидания и дисперсия показателя качества (рис. 4.5).

В связи с этим при технологической оптимизации конструкции ГИС необходимо определение начального математического ожидания, дисперсии показателя качества и периодичности промежуточных корректировок технологического процесса (параметров кривой распределения показателя качества) по критерию минимальной технологической себестоимости годного изделия.

При представлении технологического процесса изготовления ГИС СВЧ как сложной стохастической систе-

мы, ее состояние можно описать дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = m_x(t) + g(x, t)L(t),$$

где $m_x(t)$ и $g(x, t)$ — детерминированные функции; $g(x, t)L(t)$ — нормальный белый шум.

В данном выражении изменение математического ожидания описывается функцией $m_x(t)$, а дисперсии показателя качества — произведением функции $g(x, t)L(t)$. Прямое исследование технологического процесса путем решения данного дифференциального уравнения затруднено.

Рассмотрим один из способов определения плотности распределения вероятности появления брака $f(t)$ через одномерные характеристики плотности распределения $W(x, t)$ случайной функции $x(t)$, характеризующей разброс показателя качества технологического процесса производства ГИС СВЧ во времени. Примем следующие ограничения:

1) закон распределения $W(x, t)$ во времени не изменяется;

2) реализация $W_j(t)$ и моментные функции $m_x(t) = \xi_m(t)$ случайного процесса $x(t)$ во времени изменяются монотонно;

3) в начальный момент времени t_0 значение параметра находится в пределах поля допуска, т. е. $P(a < x < b, t_0) = 1$.

Вероятность того, что за время dt , примыкающее к t , значение параметра выйдет за границы поля допуска, равна

$$W(t)dt = P(t + dt) - P(t). \quad (4.7)$$

Эту вероятность можно записать через закон распределения значений x в сечениях t и $t + dt$:

$$f(t)dt = [1 - P(a < x < b; t + dt)] - [1 - P(a < x < b; t)] = |dP(a < x < b; t)| = |dW(x, t)|_{x=a}^{x=b}, \quad (4.8)$$

где a и b — границы поля допуска; w — функция распределения плотности показателя качества.

Тогда

$$f(t) = \left| \frac{dW(x, t)}{dt} \right|_{x=a}^{x=b}.$$

Знак $\left| \frac{dW(x, t)}{dx} \right|_{x=a}^{x=b}$ означает, что после дифференцирования

необходимо написать разность полученных результатов и в первом члене разности поставить вместо x значение верхней границы b поля допуска, а во втором — значение нижней границы a .

Выразим функцию $W(t)$ через одномерную плотность распределения $W(x, t)$ случайного процесса $X(t)$:

$$W(x, t) = \frac{dW(x, t)}{dx}. \quad (4.9)$$

Введем некоторую функцию $\theta(x, t)$, которая в функции $W(x, t)$ представляет собой последнюю общую ступень дифференцирования по x и t .

Для нормального случайного процесса

$$W(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(t)} \int_{-\infty}^x \exp \left\{ -\frac{[x - m_x(t)]^2}{2\sigma_x^2(t)} \right\} dx \quad (4.10)$$

функция

$$\theta(x, t) = \frac{x - m_x(t)}{\sigma_x(t)}. \quad (4.11)$$

Для закона Релея

$$W(x, t) = 1 - \exp \left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(t)} \right] \quad (4.12)$$

функция

$$\theta(x, t) = \frac{x}{\sigma_x(t)}. \quad (4.13)$$

Тогда выражение (4.9) можно записать в виде

$$W(x, t) = \frac{dF(x, t)}{d\theta(x, t)} \cdot \frac{d\theta(x, t)}{dx}. \quad (4.14)$$

Так как $\theta(x, t)$ зависит и от t , то (4.8) можно представить следующим образом:

$$f(t) = \left| \frac{dW(x, t)}{d\theta(x, t)} \cdot \frac{d\theta(x, t)}{dt} \right|_{x=a}^{x=b}.$$

С учетом (4.14) получим

$$f(t) = \left| W(x, t) \frac{d\theta(x, t)/dt}{d\theta(x, t)/dx} \right|_{x=a}^{x=b}.$$

Для нормального закона распределения при двусторонних допусках

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left| \exp \left\{ -\frac{[b - m_x(t)]^2}{2\sigma_x^2(t)} \right\} \left[\frac{b - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]' - \exp \left\{ -\frac{[a - m_x(t)]^2}{2\sigma_x^2(t)} \right\} \left[\frac{a - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]' \right|. \quad (4.15)$$

Здесь

$$\left[\frac{x - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]' = \frac{d\theta(x, t)}{dt}.$$

Для односторонних допусков

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[c - m_x(t)]^2}{2\sigma_x^2(t)} \right\} \left| \left[\frac{c - m_x(t)}{\sigma_x(t)} \right]' \right|,$$

где c — граница поля допуска a или b .

Для закона Релея

$$f(t) = \frac{1}{\sigma_x^3(t)} \left| \frac{d\sigma_x(t)}{dt} \left\{ b^2 - \exp \left[-\frac{b^2}{2\sigma_x^2(t)} \right] - a^2 \exp \left[-\frac{a^2}{2\sigma_x^2(t)} \right] \right\} \right|. \quad (4.16)$$

Из аналитических зависимостей функции $f(t)$ от одомерных характеристик плотности распределения $W(x, t)$ случайного процесса $X(t)$ и положения границ поля допуска следует, что:

1) если с течением времени дисперсия случайного процесса $X(t)$ постоянна $\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$, а математическое ожидание изменяется линейно $m_x(t) = m_0 + \Delta m t$, то закон распределения плотности вероятности брака совпадает с типом закона распределения значений x , если последний для всех моментов времени одинаков;

2) если дисперсия случайного процесса $X(t)$ постоянна $\sigma_x(t) = \sigma_0 = \text{const}$, а функция $m_x(t)$ нелинейна, то закон распределения $f(t)$ может существенно отличаться от закона распределения значений x .

В качестве примера рассмотрим случай линейного

изменения моментных функций. Пусть одномерная плотность $\omega(x, t)$ — нормальный закон с моментными функциями $m_x(t) = m_0 - \Delta m_x(t)$, $\sigma_x(t) = \Delta \sigma_x t$, а допуск односторонний с нижней границы $a < m_0$. Определить плотность $f(t)$. Из выражения (4.15) после подстановки и преобразований получим

$$f(t) = \frac{m_0 - a}{\sqrt{2\pi} \Delta \sigma_x^2 t^2} \exp \left[-\frac{(a - m_0 + \Delta m_x t)^2}{2 \Delta \sigma_x^2 t^2} \right].$$

Рассмотренный пример имеет практический интерес, так как для технологических процессов, используемых при производстве ГИС СВЧ, характерна малая скорость изменения систематических погрешностей и моментные функции для них с хорошей степенью точности могут быть приняты линейными.

Определим вероятность брака в момент времени t_k

$$P_k = \int_{t_0}^{t_k} f(t_k) dt_k. \quad (4.17)$$

Если моментные функции $\xi_m(t)$ и $\xi_\sigma(t)$ принять для данного процесса неизменными, обусловленными применяемым оборудованием и структурой процесса, то определению подлежат значения $x(t_0)$ и $\sigma(t_0)$, при которых процесс будет наиболее эффективен и экономичен, а также времени, после которого необходима корректировка процесса.

Для случая, показанного на рис. 4.5, минимальным расстоянием центра группирования от границы поля допуска a при нормальном законе распределения $x(t)$ будет $3\sigma_0$.

Будем называть партией изделия, выпущенные до первой корректировки технологического процесса. Очевидно, что количество годных изделий в партии $n = F[\sigma_x(t); t_k]$ зависит от σ_0 при фиксированном x_0 и может быть найдено из формулы (4.17). Для заданного промежутка времени $T > t_k$ будет выпущено несколько партий ГИС СВЧ. Количество перестроек составит $T/t_k = N$, а годных изделий Tn/t_k . При этом предполагается, что в результате корректировки параметры процесса x и σ возвращаются в исходное положение, а моментные функции его не изменяются. Технологическая себестоимость партий изделий

$$S_T = F_1[\sigma_x(t)]. \quad (4.18)$$

Зависимости технологической себестоимости от точности процесса определяются экспериментально. Исследования показывают, что они описываются показательными функциями.

Технологическая себестоимость годного изделия в партии

$$C_T = \frac{F_1[\sigma_x(t)]}{F[\sigma_x(t); t_k]}. \quad (4.19)$$

Если стоимость корректировки технологического процесса S_k , то технологическая себестоимость годного изделия, выпущенного за период T ,

$$C_T = \frac{F_1[\sigma_x(t)] + S_k}{F[\sigma_x(t); t_k]}. \quad (4.20)$$

Определению подлежат значения σ_0 и t_k , при которых технологическая себестоимость C_T будет минимальной. Если выражение (4.20) задано в виде явной функции этих двух неизвестных, процесс определения минимума для нее относительно прост и сводится к решению системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C_T}{\partial (\sigma_0)} &= 0; \\ \frac{\partial C_T}{\partial (t_k)} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Однако на практике часто сложно найти такую функцию. Экспериментально удается определить лишь ее статистическую модель. Тогда для определения минимума функции C_T могут быть использованы методы случайного простого и адаптивного поиска с применением ЭЦВМ.

§ 4.4. Технологическая оптимизация параметров конструкций полосковых узлов

Гибридный интегральный полосковый узел представляет собой совокупность полосковых элементов, объединенных электрическими связями и расположенных, как правило, на общей подложке. Очевидно, что брак одного из полосковых элементов приводит к браку всего узла. С учетом высокой технологической себестоимости гибридных интегральных полосковых узлов проблема технологической оптимизации очень актуальна. Однако на

пути ее решения возникает ряд существенных затруднений: основное — это отсутствие математических моделей гибридных интегральных полосковых узлов. На практике параметрический синтез ведется для полосковых элементов, которые затем объединяются в узел.

Рассмотрим способы технологической оптимизации гибридных интегральных полосковых узлов в предположении, что для каждого их элемента могут быть найдены функции распределения плотности вероятности его электрических параметров и из условий функционирования на этапе параметрического синтеза определены области работоспособности, в которых должны находиться эти параметры. При технологической оптимизации параметров необходимы: 1) оценка вероятности выхода годных гибридных полосковых узлов, учитывающая, что узел — единая система с взаимно влияющими параметрами элементов, входящих в него; 2) поиск такого сочетания конструктивных параметров, чтобы вероятность выхода годных гибридных узлов была максимальна.

Для решения второй задачи можно использовать стандартные методы, а решение первой задачи рассмотрим подробнее.

Представим конструкцию гибридного интегрального полоскового узла как некоторое множество Ω . Системой подмножеств θ множества Ω будем считать подмножества, образованные случайными конструктивными параметрами. Относительно структуры этой системы сделаем следующие предположения:

1) если A_1, A_2 — произвольная счетная последовательность множества из θ , то их сумма $\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i$ и пересечение $\bigcap_{i=1}^{\infty} A_i$ также принадлежат θ ; 2) наряду с каждым множеством A система θ содержит и его дополнение A .

Любой гибридный полосковый узел характеризуется набором некоторых электрических параметров, значения которых задаются совокупностью конструктивных параметров, т. е. совокупностью подмножеств $A_1, \dots, A_j$ множества Ω . Так как электрический параметр y_i определяется отношением в новом множестве Ω_i , состоящем из подмножеств $A_1, \dots, A_j$, представим его в виде вершины этого множества (на рис. 4.6, а вершины обозначены кружками).

Количество множеств Ω_i зависит от числа электриче-

ских параметров устройства. Они могут пересекаться и объединяться. Для ГИС СВЧ, выполненной на общей подложке, все множества Ω_i будут пересекаться, по крайней мере, по двум подмножествам: диэлектрической проницаемости материала подложки ϵ и ее толщине h , т. е. все множества Ω_i толерантны.

Введем определение: объединением множеств Ω_i будет являться множество Ω . Данное определение следует из того, что гибридный интегральный полосковый узел

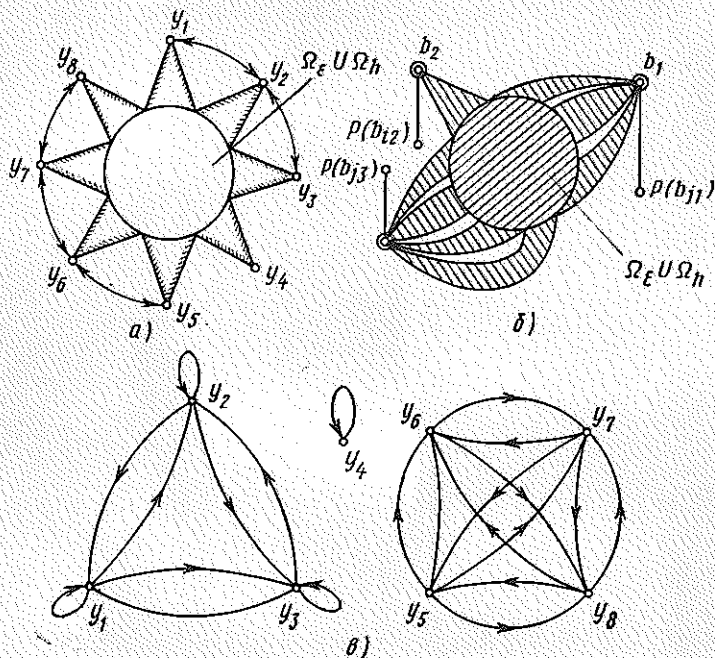


Рис. 4.6. Формализованное представление конструкции ГИС СВЧ

не имеет конструктивных параметров, не влияющих на его электрические параметры.

Условия функционирования гибридного интегрального полоскового узла накладывают на его электрические параметры y_i ряд ограничений: параметр должен находиться в некотором интервале значений, т. е. соответствовать полю допуска [см. формулу (4.1)]; несколько параметров должны соответствовать друг другу при заданных ограничениях на границы соответствия [см. формулу (4.6)].

Так как Ω является объединением A_i , образованным случайными конструкционными параметрами, электрический параметр, определенный элементами множества Ω_i , также является случайной величиной. Поэтому мерой соответствия условиям функционирования явится вероятность их выполнения в вершине множества Ω_i , которая будет зависеть от элементов множества Ω_i и наложенных ограничений.

Первое условие функционирования (рис. 4.6, б) представим вершиной b_2 , второе — как совпадение b_1, b_3 вершин множеств. Если множество Ω_i имеет несколько n вершин, то его можно рассматривать как n полностью совпадающих множеств, на вершины которых наложены соответствующие ограничения.

Соответствие вершин множеств удобно записать в виде матрицы. Для этого вершины множеств Ω_i запишем в строках и столбцах так, чтобы в каждом классе соответствия принадлежащие ему вершины стояли рядом. Тогда единичные элементы матрицы образуют непересекающиеся квадраты, диагонали которых расположены по главной диагонали матрицы.

Так, для случая соответствия, показанного на рис. 4.6, б, матрица соответствия имеет вид:

	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
y_1	1	1	1	0	0	0	0	0
y_2	1	1	1	0	0	0	0	0
y_3	1	1	1	0	0	0	0	0
y_4	0	0	0	1	0	0	0	0
y_5	0	0	0	0	1	1	1	1
y_6	0	0	0	0	1	1	1	1
y_7	0	0	0	0	1	1	1	1
y_8	0	0	0	0	1	1	1	1

Целесообразно отметить, что получено дискретное пространство событий, характеризующее конструкцию гибридного интегрального полоскового узла. События, образующие дискретное пространство, характеризуются условиями соответствия электрических параметров гибридного интегрального полоскового узла: событие b_i — электрический параметр y_i находится в некотором за-

данном интервале значений (соответствует допуску); событие b_j — параметры $y_1, \dots, y_n$ соответствуют друг другу, т. е. имеют вероятностную меру.

Граф этой матрицы, т. е. граф соответствия, представлен на рис. 4.6, а.

В дальнейшем изложении объединения вершин $b_1, b_2, b_3, \dots, b_i$ будем называть узлами. При определении вероятностной меры выполнения событий b_i и b_j для каждого узла необходимо учитывать, что электрические параметры, объединяемые в узлах, в общем случае связаны через подмножества конструктивных параметров, т. е. вероятность выполнения условий функционирования в узле при количестве объединяемых вершин, большем или равном двум, будет условной вероятностью:

$$P(b_{i_1}) = P(y_1) P_{y_1}(y_2) P_{y_1 y_2}(y_3);$$

$$P(b_{j_5}) = P(y_5) P_{y_5}(y_6) P_{y_5 y_6}(y_7) P_{y_5 y_6 y_7}(y_8).$$

Поскольку предполагается, что безусловные функции распределения электрических параметров известны, для определения условной вероятности работоспособности в узле необходимо найти связь между условной и безусловной вероятностью выполнения условий работоспособности для каждой вершины, входящей в узел.

Рассмотрим решение этой задачи. Из совокупности электрических параметров, характеризующих гибридный интегральный полосковый узел, выделим параметр y_1 , на который задан допуск $\pm \Delta y = D$ (например, входное или выходное сопротивление узла и т. д.), а множество вершин графа соответствия преобразуем в упорядоченное. При этом не существенно, в каком порядке они будут пронумерованы, важно, чтобы нумерация сохранилась неизменной на протяжении всего рассуждения. Считая известными безусловные функции распределения электрических параметров в вершинах графа соответствия, найдем на их основе условные функции распределения. Пусть заданы безусловные функции распределения $W(y_1)$ и $W(y_2)$ в первой и второй вершинах и известна область работоспособности s' , в которой удовлетворяются условия функционирования гибридного интегрального полоскового узла по данным параметрам. Границы области (рис. 4.7) записываем как функцию $D_2(y_1)$ или $D_1(y_2)$.

Нетрудно показать, что

$$W(y_2/y_1) = \frac{\int_{D_1(y_2)} W(y_1) dy_1}{\int_{S'} W(y_1) W(y_2) dy_1 dy_2} W(y_2),$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} W(y_2/y_1) &= K_2(y_2; D_1) W(y_2); \\ W(y_1/y_2) &= K_2(y_1; D_2) W(y_1). \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

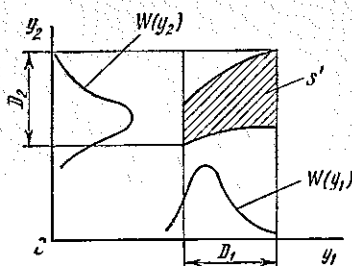


Рис. 4.7. Законы распределения и область функционирования для двух гибридных интегральных полосковых узлов

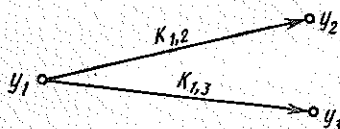


Рис. 4.8. Связанный подграф узла

Нахождение функций распределения условных вероятностей для всех вершин относительно исходной — $W(y_2/y_1); W(y_3/y_1) \dots W(y_n/y_1)$ посредством $K_{12}, K_{13}, \dots, K_{1n}$ удобно представить в виде связанного подграфа

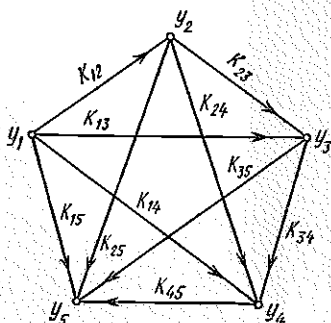


Рис. 4.9. Граф гибридного интегрального полоскового узла

(рис. 4.8). Вершинам сопоставим безусловные функции распределения плотности вероятности по соответствующему электрическому параметру y_i , а ребрам придадим вес функции связи K_i . Так как этот подграф содержит все вершины, но не содержит контуров, он является деревом с корнем y_1 ; а дерево содержит все вершины графа, поэтому оно является покрывающим деревом, или остовом. Нетрудно заметить, что покрывающее дерево образуют только ребра, исходящие из y_1 вместе

: инцидентными им вершинами. Для других вершин ($y_2, \dots, y_n$) аналогичные деревья, образованные исходящими ребрами, не будут покрывающими, что следует из понятия условной вероятности.

Из свойства (4.21) функции связи видно, что ребра подграфа ориентированы, их началом является исходная вершина, а направление определяется индексами вершин — $K_{12}, K_{13}, \dots, K_{1n}$. Данное дерево является подграфом полного графа, характеризующего конструкцию гибридного интегрального полоскового узла, количество вершин n которого соответствует числу электрических параметров, а число ребер равно $1/2 n(n-1)$. В качестве примера ограничимся пятью вершинами (рис. 4.9). Граф характеризует определенные функции распределения плотности условной вероятности годности гибридного интегрального полоскового узла по электрическим параметрам. Для определения направлений ребер графа воспользуемся понятием направленного контура, под которым будем понимать контур с вершинами, помеченными индексами, которые соответствуют направлению и порядку обхода. Для каждой вершины ребра ориентированы так, что имеют начало во всех ранее пройденных, а конец — в рассматриваемой вершине. Это условие определено понятием условной вероятности.

Направление ребер можно записать матрицей вершин $A_a = [a_{ij}]$, которую определяют следующим образом. Порядок этой матрицы $m \times n$, где m — число ребер; n — число вершин, $a_{ij} = 1$; если конец ребра j совпадает с вершиной i , а ребро имеет направление от вершины i ; $a_{ij} = -1$; если конец ребра j совпадает с вершиной, а ребро имеет направление к вершине i ; $a_{ij} = 0$, если конец ребра не совпадает с вершиной i . Для рассматриваемого случая (рис. 4.9) матрица вершин имеет вид:

$$A_a =$$

	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{23}	K_{24}	K_{25}	K_{34}	K_{35}	K_{45}
y_1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
y_2	-1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
y_3	0	-1	0	0	-1	0	0	1	1	0
y_4	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	0	1
y_5	0	0	0	-1	0	0	-1	0	-1	-1

Для исходной вершины y_1 вероятность функционирования (безусловная) определяют из функции распределения плотности вероятности y_1 и условий работоспособности. Для других вершин функция распределения плотности условной вероятности — это произведение функции распределения безусловной вероятности в вершине на функции связи, соответствующие ребрам, концы которых совпадают с вершиной, имеющим направление к вершине, т. е. инцидентным ей,

вершины

$$\begin{aligned} \text{I} &\rightarrow W(y_1) \\ \text{II} &\rightarrow W(y_2) K_{12} \\ \text{III} &\rightarrow W(y_3) K_{13} K_{23} \\ \text{IV} &\rightarrow W(y_4) K_{14} K_{24} K_{34} \\ \text{V} &\rightarrow W(y_5) (K_{15} K_{25} K_{35} K_{45} \\ &\quad \prod_{m=1}^{n-1} K_{m1}), \text{ если } K_{00} = 1. \\ n\text{-я} &\rightarrow W(y_n) \prod_{m=1}^{n-1} K_{nm}, \end{aligned}$$

Данным методом могут быть найдены функции условного распределения во всех вершинах графа соответствий. На их основе определим условные вероятности выполнения условий работоспособности.

Пусть эти условия определяют область существования конструктивных параметров s_Σ , где эти условия выполняются. Условную вероятность функционирования в узле можно определить так:

$$\begin{aligned} P_y &= \int_{D_1} W(y_1) dy_1 \int_{s_\Sigma} W(y_2) K_{12} dy_2 \dots \\ &\dots \int_{s_\Sigma} W(y_5) K_{15} K_{25} K_{35} K_{45} dy_{15}. \end{aligned}$$

Гибридный интегральный полосковый узел представляет совокупность этих узлов. Такое представление удобно для выявления конструктивных параметров, наиболее критичных к точности, и позволяет определить путь оптимизации конструкции. На рис. 4.6, б вероятность выполнения условий работоспособности в узлах отображается отрезками прямых линий, один конец которых совпадает с соответствующим узлом, а длина отра-

жает вероятность, ее величина откладывается в произвольном, но общем для отрезков масштабе.

Если узлы не связаны через подмножества конструктивных параметров, вероятность выхода годных гибридных интегральных полосковых узлов находится как произведение вероятностей в узлах. При наличии такой связи эта вероятность должна находиться как условная. В этом случае гибридный интегральный полосковый узел представляется как совокупность электрических параметров (вершин).

Аналогично рассмотренной методике находят функцию связи и определяют условную вероятность выхода годных гибридных интегральных полосковых узлов как условную вероятность функционирования. Ее расчет выполняют следующим образом: 1) определяют количество анализируемых электрических параметров гибридного интегрального полоскового узла, их зависимости от совокупности конструктивных параметров, взаимные связи через подмножества и условия соответствия; основой для этого являются аналитические выражения, использованные для расчета полосковых элементов; 2) находят функции распределения плотности вероятности для вершин; 3) строят граф соответствия и находят функции связи; 4) определяют условную вероятность годности гибридного интегрального полоскового узла.

Для расчета условной вероятности выхода годных используют ЭВМ.

На рис. 4.10 представлен граф-схема алгоритма расчета вероятности выхода годных гибридных интегральных полосковых узлов.

На вход граф-схемы (вершина *I*) подается массив значений конструктивных параметров, для которых ведется расчет вероятности выхода годных. Вершинам *I—V* сопоставлены безусловные функции распределения плотности вероятностей электрических параметров; дугам *I, II; III; IV, V*—функции, определяющие области работоспособности. При прохождении дуг *I, II—IV, V* производится расчет функций связи. Петли, касательные к вершинам *I—V*, иллюстрируют расчет соответствующих условных функций распределения, которые затем используются при прохождении дуг *I, VI; II, VI; V, VI* для расчета условной вероятности выхода годных.

В вершине *VI* производится перемножение условных вероятностей и сравнение полученных результатов с на-

ложенными ограничениями. Если требуемые неравенства не выполняются, на вход граф-схемы (дуга VI, I) подается сигнал о прекращении расчетов и изменении массива исходных данных. Новый исходный массив формируется с учетом результатов произведенных ранее расчетов так же, как при адаптивном последовательном поиске экстремума функции многих переменных (см

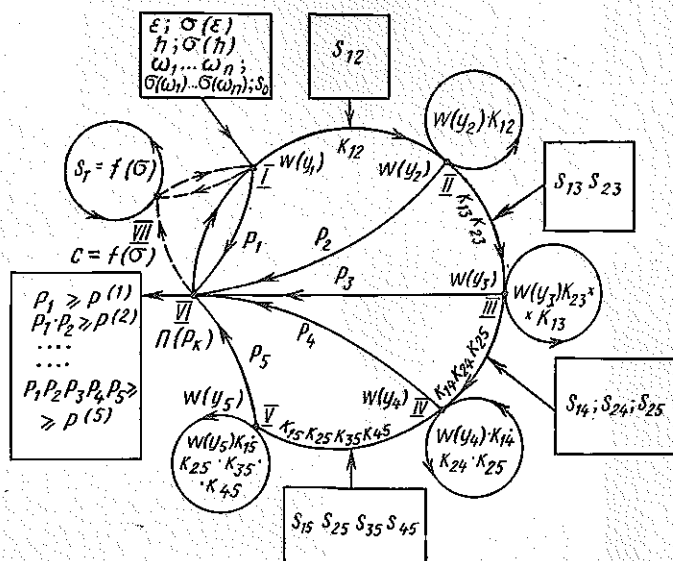


Рис. 4.10. Граф-схема алгоритма расчета вероятности выхода годных гибридных интегральных полосковых узлов

§ 4.1). При этом решается и вторая задача технологической оптимизации — отыскание такой совокупности конструктивных параметров гибридного интегрального полоскового узла, для которой вероятность выхода годных при неизменном технологическом процессе будет максимальной.

Расчет ведется в такой последовательности.

Сигнал (массив исходных данных) подается в вершину I. Далее он проходит через дугу VI, I, где производится расчет вероятности годности для вершины I значение которой в узле VI сравнивается с наложенными ограничениями. При невыполнении неравенства сигнал п

дуге VI , I возвращается в вершину I , что служит командой для прекращения расчетов и замены массива исходных данных. Если такая команда отсутствует (неравенство выполнимо), то процесс расчета продолжается — при прохождении дуги I , II определяется функция связи, далее при прохождении касательной петли находят условную функцию распределения плотности вероятности, а при прохождении дуги II , VI рассчитывают условную вероятность выхода годных. Процесс в узле VI аналогичен рассмотренному ранее.

Далее процесс повторяется для дуги II , III , узла III и т. д.

Если при технологической оптимизации допустимо изменение величины технологических погрешностей параметров конструкции гибридного интегрального полоскового узла, приведенная ранее методика позволяет определить максимальную вероятность выхода годных изделий при каждой из исследуемых величин погрешностей, т. е. знаменатель в (4.5). Если учесть, что гибридный интегральный полосковый узел изготовлен на общей подложке, то для оценки технологической себестоимости партии узлов можно использовать выражение (4.6). Когда, определив для каждого значения точности максимальную вероятность выхода годных, а затем себестоимость годного изделия, можно определить совокупность номинальных параметров конструкции и точности их изготовления, при которых себестоимость годного изделия минимальна.

На граф-схеме (см. рис. 4.11) этот этап технологической оптимизации характеризуется вершиной VII , касательным контуром к ней и дугами VI , VII ; I , VII и VII , I (показаны пунктиром).

При наличии этого этапа в вершину VII поступает значение максимальной вероятности выхода годных $\gamma(P_k)$ из вершины VI , в касательном контуре рассчитывается себестоимость партии гибридных интегральных полосковых узлов для заданного массивом исходных данных σ , в вершине VII вычисляется технологическая себестоимость годного изделия и результаты расчетов поступают на вход граф-схемы. На их основе формируются новый массив исходных данных.

Глава 5

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Анализ конструкций ГИС СВЧ и производственных процессов, используемых для их изготовления, показывает, что можно выделить четыре основных группы погрешностей: микрогеометрии, разброс электрических и магнитных параметров конструкционных материалов, формы. Каждая группа включает в себя несколько видов. Классификация погрешностей приведена на рис. 5.1. Так как они являются погрешностями конструкции и зависят от технологического процесса производства, в дальнейшем будем называть их конструктивно-технологическими погрешностями. Для микрополосковых линий (МПЛ) наиболее характерны погрешности *I*, *I'*, *III* групп.

По своему характеру эти погрешности могут быть регулярными и нерегулярными. Регулярные — характеризуются отклонением от номинальных параметров конструкции строго постоянным в пределах одного образца, но случайным в пределах партии ГИС СВЧ, а нерегулярные — случайным колебанием конструкционных параметров, как в пределах изделия, так и в партии. В конструкции регулярные и нерегулярные погрешности могут быть отдельно или в совокупности. В процессе технологической оптимизации необходимо учесть степень влияния этих погрешностей на электрические характеристики элементов ГИС СВЧ.

§ 5.1. Влияние свойств токонесущей поверхности на величину активных потерь

В полосковой линии существуют три вида потерь — в проводниках, в диэлектрической среде и потери на из-

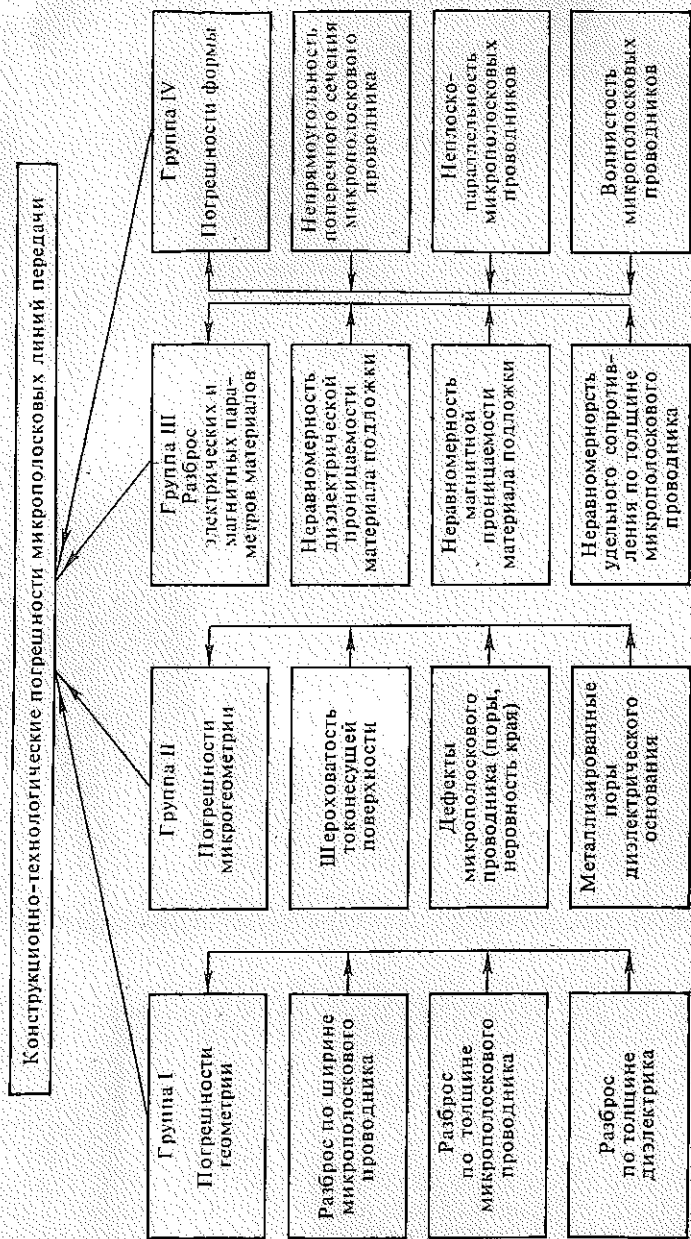


Рис. 5.1. Классификация конструктивно-технологических погрешностей микрополосковых линий передачи

лучение. Результирующее затухание, подвергающееся непосредственному измерению, обычно рассматривается как их сумма. Экспериментальные исследования показывают, что для полосковых линий фактическое значение затухания существенно превышает расчетное. Причина несовпадения теоретических и экспериментальных значений в том, что при расчете не учитываются погрешности, обусловленные технологическим процессом изготовления полосковых линий, ведущие к росту затухания.

К этим погрешностям относятся: 1) шероховатость токонесущих поверхностей полосковых проводников; 2) отличие сопротивления металла проводников от сопротивления «массивного» металла, на которое обычно ведется расчет затухания; 3) многослойность полосковых проводников, состоящих из слоев металлов с разной проводимостью. Перечисленные погрешности возникают на этапе изготовления и влияют на величину потерь в проводниках (см. гл. 2).

Величина затухания, обусловленного потерями в полосковых проводниках при известном распределении тока, определяется выражением

$$\alpha_{\Pi} = \frac{R_{s1}}{2Z_0} \int_C \frac{|J_1|^2}{|I|^2} dx + N \frac{R_{s2}}{Z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|J_2|^2}{|I|^2} dx, \quad (5.1)$$

где Z_0 — волновое сопротивление полосковой линии; $R_{s1} = (\pi f \mu_1 \rho_1)^{1/2}$ и $R_{s2} = (\pi f \mu_2 \rho_2)^{1/2}$ — поверхностные сопротивления на квадрат для полоскового проводника и заземленных пластин соответственно, Ом; $J_1(x)$ и $J_2(x)$ — распределение плотности поверхностного тока; I — величина общего тока через проводник.

Величины $\mu_1, \mu_2, \rho_1, \rho_2$ характеризуют магнитную проницаемость и удельное сопротивление материала проводника и заземленных пластин, f — рабочая частота. Множитель N зависит от типа полосковой линии. Для симметричной полосковой линии $N=1$, для несимметричной $N=1/2$. Интеграл первого слагаемого берется по контуру проводника, второго — по поверхности заземленной пластины. Однако непосредственный расчет величины затухания из (5.1) затруднен ввиду сложности аналитических выражений, характеризующих распределение плотности тока в полосковом проводнике и заземленной пластине. Для определения затухания в

несимметричной и симметричной полосковой линии используется приближенный метод, основанный на правиле «приращения индуктивности». Общее выражение для сопротивления передающей линии

$$R = \frac{1}{\mu_0} \sum_j R_{sj} \frac{\partial L}{\partial n_j}, \quad (5.2)$$

где R — сопротивление линии, Ом/м; R_s — поверхностное сопротивление, Ом/м²; μ — магнитная проницаемость среды, Н/м; ∂L — бесконечно малое приращение индуктивности, обусловленное бесконечно малым равномерным уменьшением размера ∂n всех проводников в направлении, перпендикулярном их поверхности.

Так как $a_{\pi} = \frac{R}{2Z_0}$, из (5.2) можно записать

$$\alpha_{\pi} = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \sum_j R_{sj} \frac{\partial L}{\partial n_j}. \quad (5.3)$$

Для несимметричной полосковой линии (рис. 5.2) равномерное уменьшение размеров проводников выразится через смещение

$$\delta n_j = \begin{cases} \partial h & \text{— поверхности заземленного проводника;} \\ \partial h & \text{— нижней поверхности полоскового проводника;} \\ -\partial w & \text{— краев полоскового проводника;} \\ -\partial t & \text{— нижней и верхней поверхностей полоскового проводника.} \end{cases}$$

Тогда из (5.3) получим

$$\alpha_{\pi} = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \left[\left(\frac{\partial L}{\partial h} - 2 \frac{\partial L}{\partial w} - 2 \frac{\partial L}{\partial t} \right) R_{s1} + R_{s2} \frac{\partial L}{\partial h} \right]. \quad (5.4)$$

Здесь R_{s1} и R_{s2} — поверхностные сопротивления многослойного полоскового и заземленного проводников.

Учитывая, что коэффициенты потерь (2.12) внешней поверхности полоскового проводника K_1 , его внутренней поверхности K_2 и поверхности заземленного проводника K_3 в общем случае неодинаковы, имеем

$$\alpha_{\pi} = \frac{1}{2\mu_0 Z_0} \left[\frac{R_{s1}}{2} \left(\frac{\partial L}{\partial h} - 2 \frac{\partial L}{\partial w} - 2 \frac{\partial L}{\partial t} \right) (K_1 + K_2) + K_3 R_{s2} \frac{\partial L}{\partial h} \right]. \quad (5.5)$$

Выражение для индуктивности имеет вид

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{8h}{w'} + \frac{1}{32} \left(\frac{w'}{h} \right)^2 \right] \text{ для } \frac{w}{h} \leq 2; \quad (5.6)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2} \frac{1}{\frac{w'}{2h} + \frac{1}{\pi} \left[2\pi e \left(\frac{w'}{h} + 0,94 \right) \right]} \text{ для } \frac{w}{h} > 2, \quad (5.7)$$

$$\text{где } w' = w + \Delta w; \quad \Delta w = \frac{t}{\pi} \ln \left(\frac{4\pi w}{t} + 1 \right);$$

$$\frac{w}{h} \leq \frac{1}{2\pi}; \quad \Delta w = \frac{t}{\pi} \ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right); \quad \frac{w}{h} > \frac{1}{2\pi}. \quad (5.8)$$

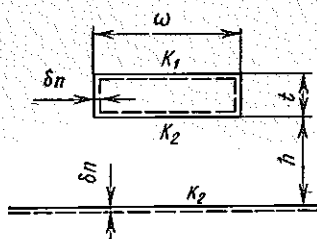


Рис. 5.2. Несимметричная полосковая линия

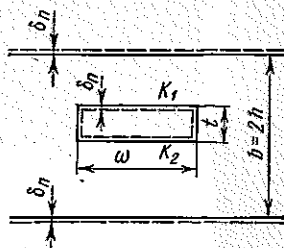


Рис. 5.3. Симметричная полосковая линия

Используя выражения (5.6) и 5.7) с учетом (5.8), вычислим частные производные в (5.5). Подставляя их значения в (5.4), получим: для $w/h \geq 2$

$$\begin{aligned} a_{\pi} = & \frac{R_s \left[1 + \frac{1}{\pi(w'/2h + 0,94)} \right]}{8Z_0 h \left\{ \frac{w'}{2h} + \frac{1}{\pi} \ln \left[2\pi e \left(\frac{w'}{h} + 0,94 \right) \right] \right\}^2} \times \\ & \times \left\{ (K_1 + K_2) \left[1 + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{2h}{t} + 1 \right) - \frac{2h}{\pi(2h+t)} \right] - \right. \\ & \left. - \left[\frac{2h^2}{\pi 2h/t + 1} - \frac{w'}{h} \right] \left(\frac{K_1 + K_2}{2} + K_3 \right) \right\}; \quad (5.9) \\ & 2 \geq \frac{w}{h} > \frac{1}{2\pi}; \quad a_{\pi} = \frac{R_s w'}{4\pi Z_0} \left(\frac{1}{16h^2} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{(w')^2} \right) \left\{ \frac{1}{h} \left[\frac{2h}{\pi(2h/t + 1)} - w' \right] \left(\frac{K_1 + K_2}{2} + K_3 \right) - \right. \end{aligned}$$

$$-\frac{K_1+K_2}{2}\left[2-\frac{1}{2\pi}\left(\ln\frac{2h}{t}+1\right)-\frac{2h}{2h+t}\right]; \quad (5.10)$$

$$\frac{w}{h} \leq \frac{1}{2\pi}; \quad a_n = \frac{R_s}{4\pi Z_0} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \left\{ \left[\frac{w'}{2h} + \frac{4t}{4\pi w + t} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{4\pi w}{t} + 1 \right) - \frac{4w}{4\pi w + t} \right] \frac{K_1+K_2}{w'} + K_3 \frac{1}{h} \right\}. \quad (5.11)$$

При симметричной полосковой линии смещение токонесущих поверхностей δn (рис. 5.3) надо рассматривать на внутренних поверхностях двух заземленных проводников и на четырех поверхностях полоскового проводника. Выраженное через размеры поперечного сечения изменение δn , перпендикулярное поверхностям заземленных проводников, требует изменения расстояния между ними на $\delta b = 2\delta n$. Аналогично произойдут необходимые изменения в размерах полоскового проводника $\delta w = -2\delta n$ и $\delta t = -2\delta n$.

Выражение (5.3) для симметричной полосковой линии передачи может быть преобразовано

$$a_n = \frac{R \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}{2 \cdot 376,6 Z_0} \left(\frac{\partial Z_0}{\partial n} \right), \quad (5.12)$$

где R — сопротивление линии, Ом/м; $\epsilon_{\text{эфф}}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость. Полное изменение величины Z_0 за счет равномерного изменения δn с учетом коэффициентов потерь принимает вид:

$$\frac{\partial Z_0}{\partial n} = 2 \frac{\partial Z_0}{\partial b} K_3 - \left(\frac{\partial Z_0}{\partial w} + \frac{\partial Z_0}{\partial t} \right) (K_1 + K_2), \quad (5.13)$$

где K_1 , K_2 и K_3 — коэффициенты потерь поверхностей полоскового и заземленного проводников.

Для случая широкого полоскового проводника, когда справедливо неравенство $\frac{w}{b-t} \geq 0,35$ и $t/b \geq 0,25$, выражение для Z_0 имеет вид

$$Z_0 = \frac{94,15}{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}} \left(\frac{w/b}{1-t/b} + \frac{C_f'}{0,0885\epsilon_{\text{эфф}}} \right)}, \quad (5.14)$$

где C_f' — краевая емкость между одним краем полоскового проводника и заземленным проводником.

Используя выражение (5.14), найдем частные производные выражения (5.13).

Так как $\frac{\partial C_f'}{\partial b} = \frac{\partial C_f'}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial b}$ и аналогично для w и t , значение dc_f'/dx можно найти, учитывая, что

$$\frac{\partial x}{\partial w} = 0; \quad \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{1}{b(1-t/b)^2}; \quad \frac{\partial x}{\partial b} = -\frac{t/b}{b(1-t/b)^2}.$$

Подстановка этих соотношений в уравнение (5.12) после упрощения дает

$$a_{\Pi} = \frac{\varepsilon_{\text{эфф}} Z_0 R}{2 \cdot 376,6 \cdot 94,15} \left\{ 2K_3 \left[w - \frac{b}{\pi} \ln(2b-t) \right] + \right. \\ \left. + (K_1 + K_2) \left[b - t + w + \frac{b}{\pi t} \ln(2b-t) \right] \right\}. \quad (5.15)$$

Для расчета затухания в симметричной и несимметричной полосковых линиях по (5.9), (5.10), (5.11) (5.15) в качестве исходных данных кроме геометрических размеров необходимо знать рабочую длину волны поверхности диэлектрика и внешней поверхности полоскового проводника, удельное сопротивление токонесущих поверхностей и толщину поверхностных слоев металла (адгезионного и защитного).

§ 5.2. Разброс геометрических размеров

Для полосковых линий передачи, симметричной и несимметричной, возможна нестабильность ширины полоскового проводника, расстояния между полосковым проводником и заземленной поверхностью. Нестабильностью (нерегулярностью) геометрических размеров будем называть их непостоянство по длине полосковой линии передачи. Возможно плавное и сосредоточенное изменение размеров. Кроме того, следует различать стабильное (регулярное) отклонение геометрических размеров от расчетной величины. Для различных полосковых линий в партии изделий оно может быть неодинаково, но строго постоянно в пределах одной полосковой линии. Нестабильность и регулярные отклонения геометрических размеров могут быть вызваны технологическими погрешностями.

При заданных значениях волнового сопротивления геометрические размеры полосковых линий можно найти из следующих выражений:

несимметричная полосковая линия

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \ln \frac{8h}{w}, \quad (5.16)$$

де $\mu = 1,26 \cdot 10^{-6}$; $\varepsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_{\text{эфф}}$; $\omega \leq h$;
симметричная полосковая линия

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{\text{эфф}}}} \ln \frac{16h}{\pi w} \text{ при } \frac{w}{2h} < 0,35. \quad (5.17)$$

Рассмотрим воздействие *регулярных отклонений геометрических размеров* на величину волнового сопротивления и значения КСВН. Введем обозначение $w/h = x$. При регулярном отклонении геометрических размеров для каждой конкретной полосковой линии

$$x = x_n + \Delta x, \quad Z_0 = Z_{0n} + \Delta Z_0,$$

де x_n и Z_{0n} — номинальные (расчетные) значения параметров полосковой линии.

Величины Δx и ΔZ_0 характеризуют приращение этих параметров в результате воздействия регулярных отклонений геометрических размеров. Для определения величины приращения ΔZ_0 при известном Δx следует вычислить разность:

$$\Delta Z_0 = Z_0(x_n) - Z_0(x_n + \Delta x).$$

На рис. 5.4 и 5.5 представлены зависимости, характеризующие изменение волнового сопротивления симметричной и несимметричной полосковых линий от регулярных отклонений геометрических размеров.

В зависимости от знака изменения волнового сопротивления величину КСВН S_u для полосковой линии с регулярным отклонением геометрических размеров можно найти следующим образом:

$$S_u = 1 + \frac{\Delta Z_0}{Z_0} \text{ для } \Delta Z_0 > 0 (\Delta x < 0);$$

$$S_u = \left(1 + \frac{\Delta Z_0}{Z_0} \right)^{-1} \text{ для } \Delta Z_0 < 0 (\Delta x > 0).$$

На рис. 5.6 представлена величина КСВН как функция изменения размеров пятидесятикратной несимметричной полосковой линии.

Рассмотрим случай, когда *отклонения размеров полосковых линий регулярны, а в пределах партии изделий подчиняются закону нормального распределения.*

Тогда волновое сопротивление, характеризующее партию полосковых линий, будет описываться вероятностными закономерностями. Для их определения необх

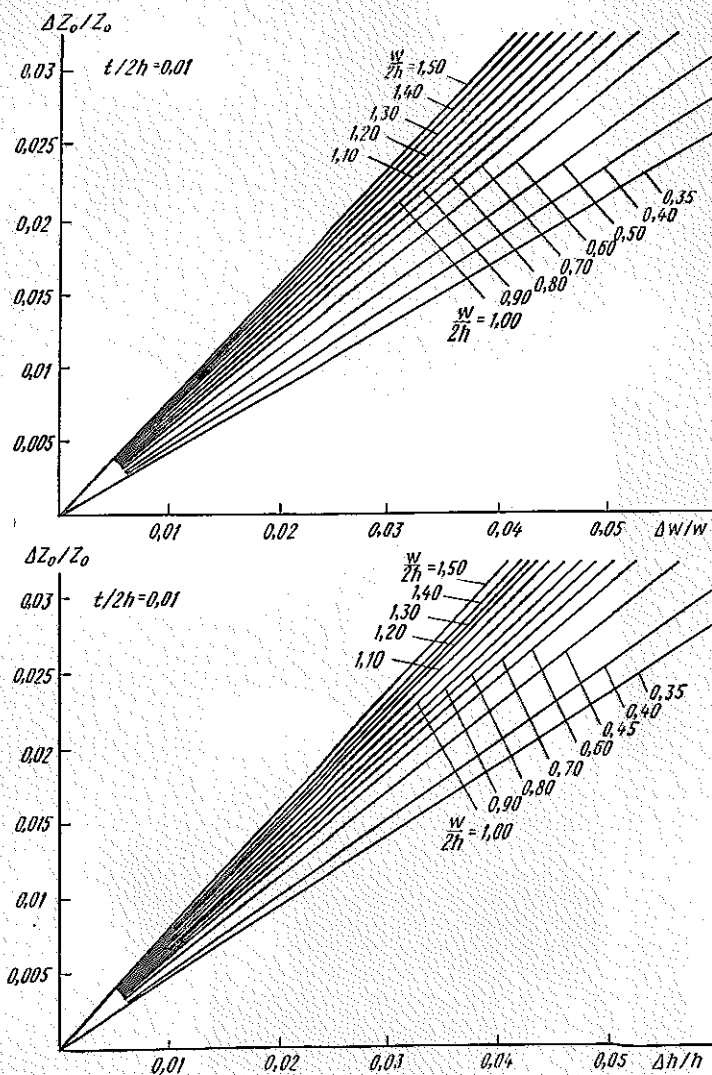


Рис. 5.4. Изменение волнового сопротивления симметричной полосковой линии от регулярных отклонений геометрических размеров

димо найти плотность вероятности логарифма отношения двух случайных величин h и w , имеющих нормальные законы распределения вероятностей.

Для рассматриваемого случая $Z_0 = a \ln ky$.

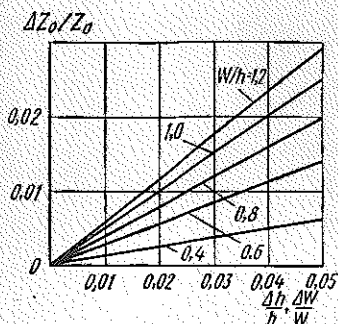


Рис. 5.5. Изменение волнового сопротивления несимметричной полосковой линии от регулярных отклонений геометрических размеров

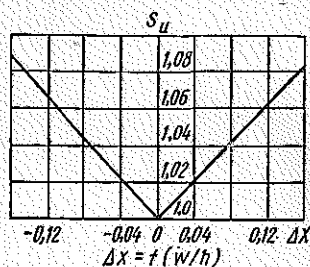


Рис. 5.6. Изменение КСВН как функции изменения размеров пятидесятиной несимметричной полосковой линии

После некоторых преобразований имеем

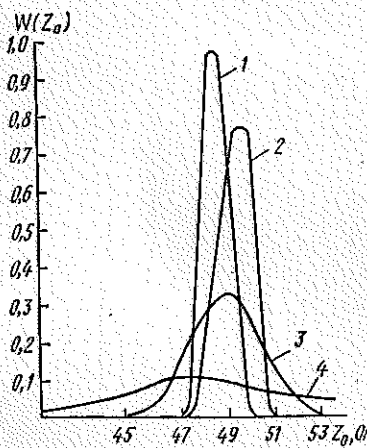
$$\begin{aligned}
 W_1(Z_0) = & \frac{k \sqrt{1-R^2} \sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right)} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-R^2)}} \times \right. \\
 & \times \frac{k\sigma_1(w\sigma_1 - Rk\sigma_2) + \sigma_2(h\sigma_2 - Rk\sigma_1) \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{\sigma_1 \sigma_2 \left[k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]^{1/2}} \times \\
 & \times \exp \left\{ - \frac{\left[kh - w \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) \right]^2}{2 \left[k^2 \sigma_1^2 - 2Rk\sigma_1 \sigma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \sigma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]} \right\}. \quad (5.18)
 \end{aligned}$$

Здесь σ_1 и σ_2 — средние квадратические отклонения слу-

чайных величин h и ω ; R — коэффициент корреляции между ними.

Для нормированных значений случайных величин $\sigma_1/h = \gamma_1$; $\sigma_2/\omega = \gamma_2$; $h/\omega = g$ выражение (5.18) можно переписать

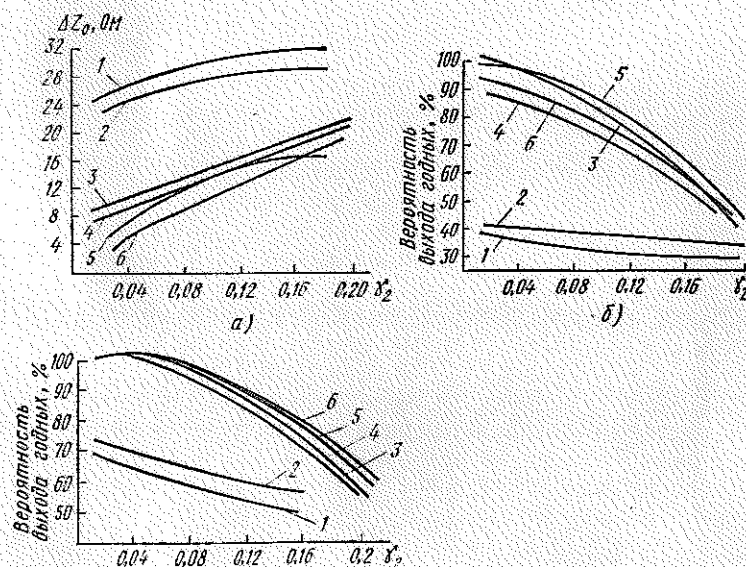
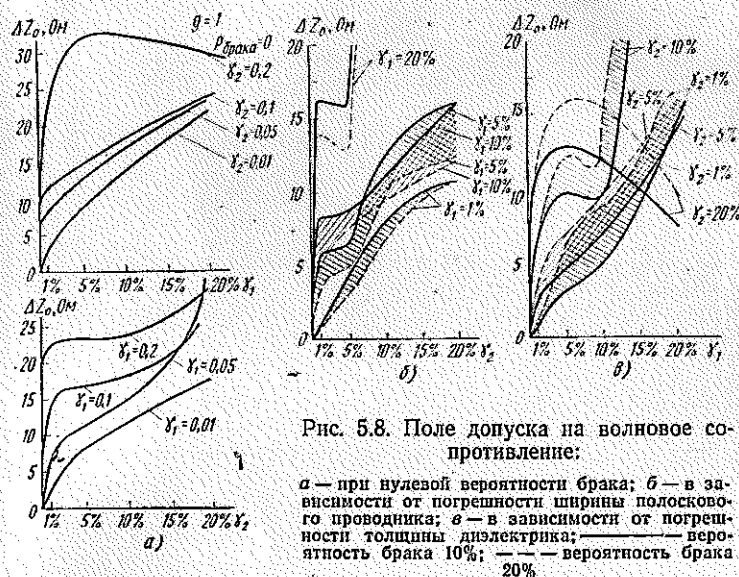
$$\begin{aligned}
 W_{1n}(Z_0) = & \frac{kg \sqrt{1-R^2}}{a\pi} \times \\
 & \times \frac{\gamma_1 \gamma_2 \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{k^2 \gamma_1^2 g^2 - 2R\gamma_1 \gamma_2 kg \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right)} \times \\
 & \times \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\pi}{2(1-R^2)}} \times \right. \\
 & \times \frac{k\gamma_1(\gamma_1 - \gamma_2 R) + \gamma_2(\gamma_2 - \gamma_1 R) \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right)}{\gamma_1 \gamma_2 \left[k^2 \gamma_1^2 g^2 - 2Rk\gamma_1 \gamma_2 g \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]^{1/2}} \left. \right\} \times \\
 & \times \exp \left\{ - \frac{\left[kg - \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) \right]^2}{2 \left[k^2 \gamma_1^2 g^2 - 2Rk\gamma_1 \gamma_2 g \exp\left(\frac{Z_0}{a}\right) + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{2Z_0}{a}\right) \right]} \right\}. \quad (5.19)
 \end{aligned}$$



На рис. 5.7 представлены кривые распределения, построенные из (5.19) в предположении, что $k=8$, а коэффициент корреляции $R=0$. На рис. 5.8 даны зависимости, характеризующие величину поля допуска на волновое сопротивление полосковой линии при нулевой, 10- и 20%-ной вероятности брака ($k=8$; $R=0$; $\omega/h=1$).

Рис. 5.7. Кривые распределения волнового сопротивления для $\gamma=0,01$, $g=1$:

кривые построены для: 1 — $\gamma_2=0,01$; 2 — $\gamma_2=0,02$; 3 — $\gamma_2=0,05$; 4 — $\gamma_2=0,2$



С их помощью можно определить допуски на геометрические размеры симметричной и несимметричной полосковой линии, при которых вероятность не превышает допустимой величины. Пользуясь этими кривыми, можно оценить ожидаемый процент брака полосковых линий при известных погрешностях геометрических размеров и заданном допуске на волновое сопротивление.

На рис. 5.9 приведены рассчитанные из (5.19) кривые, характеризующие с вероятностью 0,99 предельные изменения величины волнового сопротивления (рис. 5.9, а)*, представлены кривые, показывающие вероятность выхода годных полосковых линий при допуске на волновое сопротивление 5 (рис. 5.9, б) и 10% (рис. 5.9, в).

При росте значений γ_1 и γ_2 происходит увеличение пределов изменения волнового сопротивления, уменьшение вероятности выхода годных полосковых линий. Сравнивая результаты для $g=1$ и 0,9, видим, что одинаковые по величине погрешности оказывают более сильное влияние на ухудшение качественных показателей при меньших g .

При одновременном присутствии одинаковых по величине погрешностей размеров $\gamma_1=\gamma_2$ большее влияние на волновое сопротивление оказывает погрешность ширины полоскового проводника, а не толщина диэлектрика.

Найденное выражение плотности вероятности волнового сопротивления позволяет определить оптимальные значения номинальных размеров при данном процессе производства (при заданном разбросе), для которых вероятность нахождения Z в требуемых пределах будет максимальной. Возможно и решение обратной задачи — по допустимому разбросу Z определить значения допусков на w и h , при которых вероятность попадания Z в поле допуска будет заданной. Большой интерес представляет первая задача, так как ее решение полезно как на этапе разработки, так и при конструкторско-технологической проработке устройства в условиях стабилизированного производства.

Пусть задана область допустимых значений Z_0 , равноценная во всех точках. Воспользовавшись выражением

* Далее во всех неговоренных случаях предельные изменения величины волнового сопротивления рассчитаны также для вероятности 0,99.

для плотности распределения вероятности Z_0 (5.19), можно вычислить вероятность нахождения Z_0 в области допустимых значений при разбросе w и h , характерном для данного технологического процесса:

$$P = \int\limits_B W(Z_0) dw dh, \quad (5.20)$$

где B — область допустимых значений w и h .

Необходимо найти такой вектор $\bar{M}_0(Z_0) \in B$, для которого вероятность, вычисленная из (5.20), была бы максимальной. Так как область B определяется двумя независимыми переменными w и h , выражение (5.20) запишем в виде

$$P = \int\limits_{\min w}^{\max w} dw \int\limits_{\min h}^{\max h} W(Z_0) dh. \quad (5.21)$$

Для определения оптимальных номинальных значений параметров w и h возьмем частные производные этой формулы и приравняем их нулю:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta h} \int\limits_{\min w}^{\max w} dw \int\limits_{\min h}^{\max h} W(Z_0) dh &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial \Delta w} \int\limits_{\min w}^{\max w} dw \int\limits_{\min h}^{\max h} W(Z_0) dh &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

Учитывая, что $\max w - \min w = l_1$; $\max h - \min h = l_2$ и подставив в (5.22) выражение (5.19), после дифференцирования и некоторых преобразований получим систему из двух уравнений с двумя неизвестными для определения Δw и Δh :

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} \left[\frac{8\sigma_2}{\sigma_1} \ln \frac{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} + \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 L^2} - \right. \right. \\ \left. \left. - \sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} \right) \right] - \frac{Q}{2} \left[\frac{8\sigma_2}{\sigma_1} \ln \frac{\sigma_1^2 N + \sigma_2^2 Q^2}{\sigma_1^2 P + \sigma_2^2 Q^2} + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 Q^2} - \sqrt{\sigma_2^2 P^2 + \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] = 0, \end{aligned}$$

$$\frac{N}{2} \left[\frac{8\sigma_1}{\sigma_2} \ln \frac{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 Q^2} + \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 L^2} - \sqrt{\sigma_1^2 N^2 - \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] - \frac{R}{2} \left[\frac{8\sigma_1}{\sigma_2} \ln \frac{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2}{\sigma_1^2 N^2 + \sigma_2^2 Q^2} + \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_1^2} \left(\sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 L^2} - \sqrt{\sigma_1^2 P^2 + \sigma_2^2 Q^2} \right) \right] = 0, \quad (5.23)$$

где

$$\min w + l_1 + \Delta w = N;$$

$$\min h + l_2 + \Delta h = L;$$

$$\min w + \Delta w = P;$$

$$\min h + \Delta h = Q.$$

Решая систему уравнений (5.23), можем найти оптимальные номинальные значения геометрических размеров поперечного сечения полосковых линий. При этом кривая распределения плотности вероятности волнового сопротивления располагается относительно заданных границ поля допуска на Z_0 так, что в поле допуска находится максимальная площадь, т. е. максимальная вероятность выхода годных.

Более общим случаем является *нестабильность геометрических размеров в пределах полосковой линии*. Модель полосковой линии со случайно распределенными вдоль ее длины неоднородностями, вызванными нестабильностью геометрических размеров, дана на рис. 5.10. Здесь E — э. д. с. генератора, питающего линию; Z_0 — волновое сопротивление линии; Γ_i — коэффициент отражения от i -й неоднородности (всего в линии n неоднородностей); l_{0i} — расстояние от входа линии до

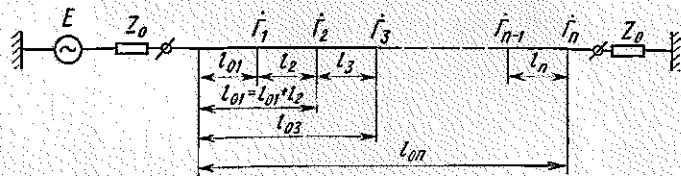


Рис. 5.10. Модели полосковой линии со случайно распределенными вдоль нее неоднородностями

i -й неоднородности, l_i — расстояние между неоднородностями. Анализ свойств волноводного тракта с малыми случайными неоднородностями выполнен Р. И. Перцем и может быть использован для статистически неоднородных полосковых линий.

Нестабильность геометрических размеров, вызванная конструкционно-технологическими погрешностями, мала, т. е. справедливо ограничение $\Gamma_i \ll 1$. Это позволяет учитывать лишь однократные отражения от неоднородностей. Тогда результирующий коэффициент отражения на входе линии запишем так:

$$\tilde{\Gamma}_0 \approx \sum_{i=1}^n (\Gamma_i)_0, \quad (5.24)$$

где $(\Gamma_i)_0$ — собственный коэффициент отражения i -й неоднородности, пересчитанный на вход линии.

Рассмотрим величину $(\Gamma_i)_0$, стоящую под знаком суммы. Учитывая, что расстояние от входа линии до сечения $\tilde{\Gamma}_i$ составляет l_{i0} и постоянная распространения линии $\gamma = \alpha + j\beta$, имеем

$$(\tilde{\Gamma}_i)_0 = \tilde{\Gamma}_i e^{-2\gamma l_{i0}}, \text{ так как } \tilde{\Gamma}_i = \Gamma_i e^{j f_i},$$

то

$$(\tilde{\Gamma}_i)_0 = \Gamma_i e^{-2\alpha l_{i0}} e^{-j(2\beta l_{i0} - f_i)}.$$

Введем обозначение

$$\Gamma_i e^{-2\alpha l_{i0}} = \Gamma_{0i},$$

где Γ_{0i} — модуль коэффициента отражения от неоднородности с номером i , пересчитанный на вход линии с учетом полных потерь.

Обозначим фазовый угол коэффициента отражения

$$f_{0i} = -2\beta l_{i0} + f_i,$$

тогда результирующий коэффициент отражения на входе полосковой линии

$$\tilde{\Gamma}_0 = \sum_{i=1}^n \Gamma_{0i} e^{j f_{0i}}. \quad (5.25)$$

В данном выражении модули коэффициентов отражения полагаем заданными. Затухание в линии до сечения неоднородности $\tilde{\Gamma}_i$ также считаем заданным с той

точностью, которая необходима для вычисления медленно меняющейся величины $e^{-2\alpha l_{0i}}$. Фазовый угол суммируемых в выражении для $\bar{\Gamma}_0$ величин является величиной случайной. Распределение плотности вероятности модуля $|\bar{\Gamma}_0| = \Gamma$ подчиняется закону Релея

$$W(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\Gamma_m^2} e^{-\frac{\Gamma^2}{2\Gamma_m^2}};$$

$$\Gamma_m^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Gamma_{0i}^2, \quad (5.26)$$

где Γ_m — наиболее вероятное значение величины Γ , соответствующее максимуму распределения плотности вероятности $W(\Gamma)$. Если ввести для малых неоднородностей понятие среднего квадрата коэффициента отражения $[\bar{\Gamma}]^2 = \sum_{i=1}^n \Gamma_{0i}^2/n$ и допустить равновероятный закон распределения неоднородностей вдоль полосковой линии, то

$$\Gamma_m^2 = \frac{n[\bar{\Gamma}]^2}{8\alpha l_{0n}} (1 - e^{-4\alpha l_{0n}}), \quad (5.27)$$

где n — число неоднородностей; αl_{0n} — полное затухание полосковой линии, Нп.

Функции распределения плотности вероятности для различных значений Γ_m приведены на рис. 5.11. Из кривых видно, что чем меньше Γ_m , тем уже область вероятных коэффициентов отражения, тем больше она смещена в сторону малых значений Γ . Уместно отметить и ярко выраженную асимметрию кривых распределения плотности вероятности.

Для расчета с заданной вероятностью модуля коэффициента отражения на входе полосковой линии может быть использована интегральная функция распределения Релея:

$$F(\Gamma_p < \Gamma) = 1 - e^{-\frac{\Gamma^2}{2\Gamma_m^2}},$$

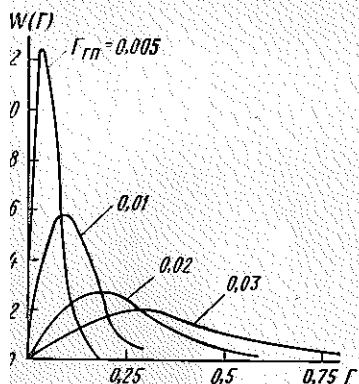
представленная на рис. 5.12. При помощи графика, определив Γ_m , можно найти вероятность P того, что коэффициент отражения Γ_p не превысит некоторой заданной

еличины Γ . Дисперсия коэффициента отражения на ходе полосковой линии и его среднеквадратическое отклонение определим из выражения

$$\sigma_{\Gamma}^2 = \frac{4-\pi}{2} \Gamma_m^2 \approx 0,43\Gamma_m^2; \quad \sigma_{\Gamma} \approx 0,656\Gamma_m. \quad (5.28)$$

Приведенные результаты можно выразить через коэффициент стоячей волны S_u следующим образом:

$$F(S_u) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S_u - 1}{S_u + 1} \right)^2 \left(\frac{S_{mu} + 1}{S_{mu} - 1} \right)^2 \right]. \quad (5.29)$$



ис. 5.11. Функции распределения плотности вероятности для различных Γ_m

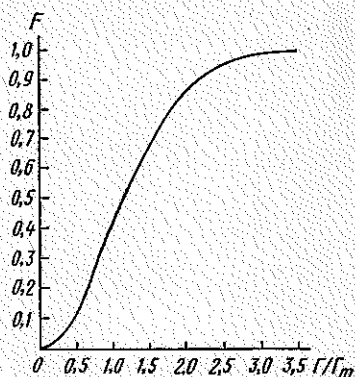


Рис. 5.12. Интегральная функция распределения Релея

Приведенное рассмотрение справедливо для большого числа реализаций полосковых линий на постоянной асоте.

Рассмотрим, как изменятся эти характеристики при работе линии в частотном диапазоне. Пусть в полосковой линии меняется частота возбуждения, тогда в общем случае меняются модули и фазы коэффициентов отражения от отдельных неоднородностей. В ограниченной полосе частот, в полосковой линии, содержащей широкополосные элементы, модуль коэффициента отражения Γ_{0i} можно считать неизменным (вероятностный характер его для партии изделий сохраняется). Фаза коэффициента отражения f_{0i} меняется в основном за счет изменения электрической длины линии. Эта часть быстро-

изменяющейся фазы коэффициента отражения, пересчитанного на вход линии, имеет следующий вид:

$$2\beta l_{0i} = \frac{4\pi l_{0i}}{\lambda_0} + \frac{4\pi l_{0i}}{\lambda_0} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{01}} \right) \frac{\Delta f}{f_0}. \quad (5.30)$$

Первый член правой части этого выражения представляет собой начальную фазу пересчитанного на вход

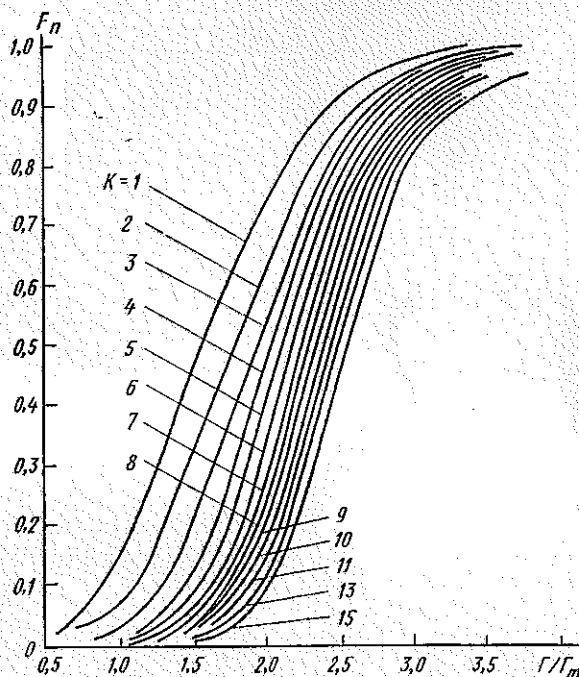


Рис. 5.13. Функция E_n при различных k

линии коэффициента отражения от одной неоднородности при частоте $f=f_0$ (без учета собственного фазового угла), а второй — изменение фазы, зависящее от приращения частоты Δf с учетом дисперсии полосковой линии $(\lambda_0/\lambda_{01})^2$. В этом случае распределение плотности вероятности коэффициента отражения в относительной полосе частот $\Delta f_m/f_0$ описывается многомерной функцией распределения, представляющей собой произведение одномерных функций распределения Релея

$$F_n(\Gamma_p < \Gamma) = \left(1 - e^{-\frac{\Gamma^2}{2\Gamma_m^2}}\right)^{k+1};$$

$$k = 2 \frac{\Delta f_m}{f_0} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{01}}\right)^2 \frac{l_{0n}}{\lambda_{01}}, \quad (5.31)$$

где Δf_m — рабочая полоса частот. При этом k не может быть больше числа неоднородностей n : $k \leq n$. Это неравенство фиксирует возможное число независимых событий. Зависимость F_n при различных k представлена на рис. 5.13. С увеличением рабочей полосы частот и большим числе неоднородностей вероятность малых значений Γ , как видно из кривых, уменьшается.

Основное назначение полосковой линии — это передача энергии СВЧ, поэтому для полной характеристики ее свойств представляет интерес анализ вероятностных параметров коэффициента передачи.

Если через U_0 обозначить напряжение падающей волны на входе полосковой линии, то без учета переотражений можно записать в сечении l_{0n} :

$$U_n = U_0 \prod_{i=1}^n (1 + \Gamma_i) e^{-\gamma l_{0i}}. \quad (5.32)$$

Из этого выражения легко получить значение коэффициента передачи или коэффициента пропускания

$$T_0 = U_0/U_n;$$

$$S_0 = 1/T_0 \approx e^{-\gamma l_{0i}} \prod_{i=1}^n (1 + \Gamma_i). \quad (5.33)$$

Первый множитель произведения характеризует регулярную линию без неоднородностей ($\Gamma_i = 0$). В рассматриваемом случае значения Γ_0 и S_0 имеют случайные отклонения, обусловленные конструкторско-технологическими погрешностями. Их влияние характеризуется вторым сомножителем. Представим его в виде

$$1 + \delta_i = \prod_{i=1}^n (1 + \tilde{\Gamma}_i), \quad (5.34)$$

где $|\delta_i|$ — относительная статистическая поправка.

При малых неоднородностях

$$\delta_i \approx \sum_{i=1}^n \Gamma_i. \quad (5.35)$$

Будем считать, что модули коэффициентов отражения от отдельных неоднородностей известны, а фаза равновероятна в интервале $0 \div 2\pi$. Тогда для δ_i справедливо распределение плотности вероятности по закону Релея откуда

$$F(\delta_i < \delta) = 1 - e^{-\frac{\delta^2}{2\delta_m^2}}; \quad (5.36)$$

$$\delta_m^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Gamma_i^2. \quad (5.37)$$

Дисперсию и среднеквадратическое отклонение δ_i определяем из выражений

$$\begin{aligned} \sigma_\delta^2 &= 0,436\delta_m^2; \\ \sigma_\delta &= 0,656\delta_m. \end{aligned} \quad (5.38)$$

Рассмотрим, каковы будут случайные изменения электрической длины линии передачи, вызванные малыми неоднородностями

$$\Delta f_0 = \arg \prod_{i=1}^n (1 + \Gamma_i). \quad (5.39)$$

Так как аргумент произведения равен произведению аргументов,

$$\Delta f_0 = \sum_{i=1}^n \arg(1 + \Gamma_i). \quad (5.40)$$

Зная, что $\Gamma_i = \Gamma_i e^{jf_i}$, нетрудно показать, что

$$\arg(1 + \Gamma_i) = \arctg \frac{\Gamma_i \sin f_i}{1 + \Gamma_i \cos f_i} \approx \Gamma_i \sin f_i, \quad (5.41)$$

где f_i — случайная величина с равновероятным распределением в интервале $0 \div 2\pi$. Суммарное приращение электрической длины

$$\Delta f_0 \approx \sum_{i=1}^n \Gamma_i \sin f_i. \quad (5.42)$$

Воспользовавшись центральной предельной теоремой и учитывая, что Δf_0 выражается суммой независимых случайных величин, можем принять нормальный закон распределения

$$W(\Delta f) = \frac{1}{\sigma_{\Delta f} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta f^2}{2\sigma_{\Delta f}^2}}, \quad (5.43)$$

где

$$\sigma_{\Delta f}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Gamma_i^2 = \delta_m^2. \quad (5.44)$$

Статистические характеристики коэффициента отражения на входе полосковой линии, модуля и фазы коэффициента передачи (или пропускания) связаны между собой. Это позволяет построить графики зависимости между КСВН и среднеквадратическим отклонением модуля и фазы коэффициента передачи (пропускания). Графики (рис. 5.14, *a—г*) построены для вероятности КСВН, равной 0,7.

Из сказанного видно, что статистически неоднородная полосковая линия характеризуется наличием отраженных волн даже в том случае, если она нагружена на расчетное волновое сопротивление. При этом отсутствие согласования и принятое ранее предположение о равновероятном распределении неоднородностей вдоль линии позволяют говорить об изменении волнового сопротивления полосковой линии, вызванном конструктивными технологическими погрешностями. В дальнейшем волновым сопротивлением неоднородной полосковой линии будем считать такое сопротивление, при нагружении на которое $|\dot{\Gamma}|=0$. Так как коэффициент отражения в неоднородной полосковой линии является величиной случайной, ее волновое сопротивление также будет случайной величиной. Воспользуемся соотношением

$$Z_n = Z_0 \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|}. \quad (5.45)$$

Определяется условие, при котором $|\dot{\Gamma}|=0$, тогда можно записать, что

$$Z_n = Z_0 S_u, \quad (5.46)$$

где S_u — КСВН полосковой линии.

Для статистически неоднородной полосковой линии первый сомножитель выражает влияние регулярного, а второй — нерегулярного изменения геометрических размеров полосковой линии.

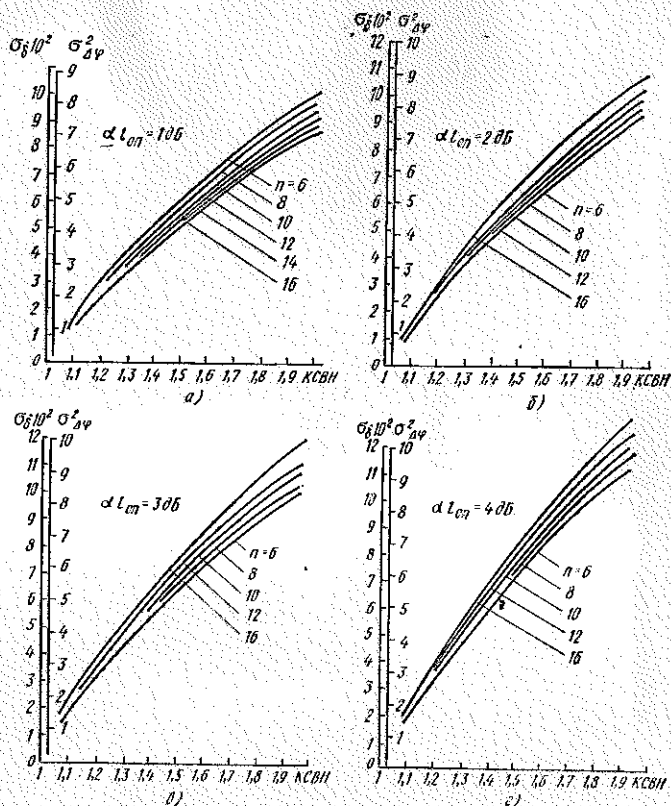


Рис. 5.14. Зависимость КСВН от среднеквадратичного отклонения модуля и фазы коэффициента передачи

При известных выражениях для плотности вероятностей сомножителей в выражении (5.46) можно найти, во-первых, вероятность того, что при заданных регулярных изменениях ширины полоскового проводника и толщины диэлектрика значения Z_n лежат в требуемых границах и, во-вторых, что при заданных нерегулярных изменениях этих размеров значения КСВН не превысят

заданную величину. Тогда вероятность того, что Z_n лежит в заданных границах, будет равна произведению вероятностей для Z_0 и S_n . Таким образом, при заданном технологическом процессе, характеризующемся определенными погрешностями, и конструкторских допусках, назначенных на размеры полосковой линии, определяют вероятность того, что ее значение волнового сопротивления будет соответствовать заданным требованиям. По результатам расчетов можно судить о необходимости корректировки допусков на размеры или технологического процесса.

Нестабильность ширины полоскового проводника в основном обусловлена тем, что его края непрямолинейны. Край полоскового проводника представляет собой ломаную линию, глубина вырывов и высота выступов которой определяется технологическим процессом изготовления.

При количественном анализе степени влияния нестабильности ширины полоскового проводника на величины КСВН и Z_0 необходимо определить значения Γ_m для исследуемой линии с определенными дефектами границы полоскового проводника.

Найти значения Γ_m можно, используя матрицу передачи участка полосковой линии, содержащего скачок волнового сопротивления. Она представляет собой произведение нормированной волновой матрицы передачи отрезка однородной линии длиной θ_i на матрицу скачка волновых сопротивлений. При этом необходимо располагать зависимостями, характеризующими изменение

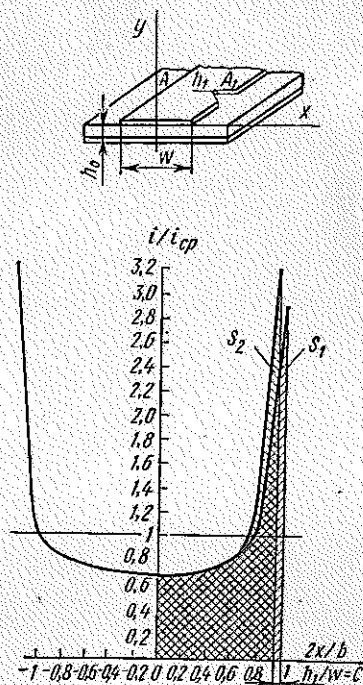


Рис. 5.15. Распределение плотности тока в полосковом проводнике

волнового сопротивления полосковой линии в области дефекта края от его глубины. Определим эту зависимость для несимметричной полосковой линии.

Распределение токов в полосковом проводнике имеет довольно сложный характер. Большая часть общего тока протекает по краям проводника (рис. 5.15). Из графика видно, что плотность тока на краях полоскового проводника более чем в три раза превышает среднюю плотность тока в проводнике. Отсюда видно, что местная деформация края проводника приведет к значительному перераспределению плотности тока в нем. Представляет интерес вывод аналитической зависимости плотности тока на краю проводника в месте его максимальной деформации от глубины вырыва. За исходное принимается выражение для распределения тока в полосковом проводнике

$$i(\xi) = \frac{1}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} [A\xi^4 - B\xi^2 + C_1] \quad (5.47)$$

для

$$0,33 \leq h/w \leq \infty.$$

При выводе зависимости плотности тока на краю полоскового проводника от глубины вырыва использовались следующие допущения: а) в деформированной части полоскового проводника изменение плотности тока по ширине происходит по тому же закону, что и в недеформированной; б) при деформации проводника плотность тока в его середине остается постоянной.

Для незначительных деформаций, которые могут иметь место в рассматриваемом случае, эти допущения справедливы. Решение находим из условий, что ток, протекающий в деформированной и недеформированной частях проводника, одинаков по величине, т. е. $s_1 = s_2$ (см. рис. 5.15):

$$s_1 = \int_0^1 \frac{1}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} (A\xi^4 - B\xi^2 + C_1) d\xi; \quad (5.48)$$

$$s_2 = \int_0^{1-c} \frac{1}{\pi \sqrt{1-\xi^2}} (A_1 \xi^4 - B_1 \xi^2 + C_2) d\xi. \quad (5.49)$$

Для определения s_1 используем следующую подстановку: $\xi = \sin \alpha$; $d\xi = \cos \alpha d\alpha$.

Произведя интегрирование с учетом значений постоянных, имеем при $A=0,03$; $B=0,308$; $C_1=1,143$

$$s_1 = \frac{3}{16} A - \frac{1}{4} B + \frac{1}{2} C_1 = 0,5. \quad (5.50)$$

Аналогично определим

$$s_2 = \frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{3}{8} A_1 - \frac{1}{2} B_1 + C_2 \right) \arcsin(1-C) + \right. \\ \left. + \frac{B_1 - A_1}{2} (1-C) \sqrt{2C - C^2} + \frac{A_1}{8} (1-C) (4C - \right. \\ \left. - 1 - 2C^2) \sqrt{2C - C^2} \right]. \quad (5.51)$$

Учитывая, что $s_1=s_2$, найдем значения A_1 , B_1 и C_2 . Для этого примем $B_1=0$, а $C_2=C_1=1,143$.

Тогда

$$\frac{1}{\pi} \left[\left(\frac{3}{8} A_1 + C_2 \right) \arcsin(1-C) - \frac{A_1}{2} (1-C) \sqrt{2C - C^2} + \right. \\ \left. + \frac{A_1}{8} (1-C) (4C - 1 - 2C^2) \sqrt{2C - C^2} \right] = 0,5. \quad (5.52)$$

После некоторых преобразований выражения (5.52) имеем

$$A_1 = \frac{8[1,57 - C_2 \arcsin(1-C)]}{3 \arcsin(1-C) + (1-C) \sqrt{2C - C^2} (4C - 5 - 2C^2)}. \quad (5.53)$$

При этом выражение, характеризующее распределение тока в полосковом проводнике, имеет вид

$$i(\xi) = \frac{1}{\pi \sqrt{1 - \xi^2}} (A_1 \xi^4 + C_2). \quad (5.54)$$

Эта формула позволяет определить зависимость плотности тока на краю проводника от глубины деформаций. Результаты расчетов по выражению (5.54) можно представить в виде таблицы (табл. 5.1).

Таблица 5.1

C	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
A_1	—0,145	0,07	0,157	0,485	1,16	3	5,45	18,4

По найденным из (5.53) значениям постоянной A_1 можно записать функции распределения тока в попереч-

ном сечении деформируемого полоскового проводника для каждого из исследованных значений C_1 , а по ним найти значения Z_1 в соответствии с выражением

$$Z_1 = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{I} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon}} \int_{-1}^{+1} i(\xi) \ln \frac{\sqrt{\xi^2 - \delta}}{\xi} d\xi, \quad (5.55)$$

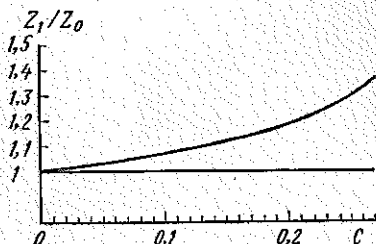


Рис. 5.16. Зависимость волнового сопротивления от дефекта края полоскового проводника

для чего (5.55) количественно интегрируется. Результаты расчетов даны в виде графика (рис. 5.16). Как видно из кривых, значения Z_1/Z_0 зависят от величины C .

Произведя предварительный статистический анализ геометрии края полоскового проводника, определим наиболее вероятное значение C , характеризующее техно-

логический процесс. Затем для этого C найдем значение Z_1 и определим Γ_m .

§ 5.3. Разброс электрических и магнитных параметров подложек

Диэлектрическое заполнение полосковых линий существенно влияет на их электрические характеристики, так как является средой, в которой распространяется электромагнитное поле СВЧ. Поэтому для обеспечения стабильности, воспроизводимости и равенства электрических характеристик полосковых линий расчетным величинам диэлектрическая проницаемость заполнителя должна быть стабильной как в пределах одной полосковой линии, так и в пределах партии изделий и не изменяться от партии к партии. Однако для практических конструкций это требование выполнить не удастся. Экспериментальные исследования свойств диэлектрических плат показывают, что имеют место как регулярные погрешности по ϵ , т. е. стабильность ее в пределах полосковой линии и нестабильность в пределах партии изделий, так и нерегулярные — нестабильность ϵ в пределах

полосковой линии. Рассмотрим степень влияния погрешности ε на волновое сопротивление полосковых линий.

Для несимметричной полосковой линии, выполненной на твердом диэлектрике, значение волнового сопротивления в общем случае может быть записано так:

$$Z_0 = Z_{0д} / \sqrt{\varepsilon_{эфф}}, \quad (5.56)$$

где $Z'_{0д}$ — волновое сопротивление несимметричной полосковой линии с воздушным диэлектрическим заполнением; $\varepsilon_{эфф}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость, отличная от диэлектрической проницаемости материала подложки за счет существования поля в воздухе.

Для симметричных полосковых линий

$$Z'_0 = Z'_{0д} / \sqrt{\varepsilon}, \quad (5.57)$$

где $Z'_{0д}$ — волновое сопротивление симметричной полосковой линии с воздушным диэлектрическим заполнением; ε — диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего линию.

Определить влияние регулярных отклонений диэлектрической проницаемости твердого заполнения на волновое сопротивление несимметричной полосковой линии можно, связав эффективную диэлектрическую проницаемость с диэлектрической проницаемостью материала подложки. Пусть k — регулярное отклонение диэлектрической проницаемости материала подложки с проницаемостью ε . Обозначим индексом n — номинальную величину диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon = (1 + k) \varepsilon_n.$$

Значение эффективной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{эфф}$, как показал Коуп, можно записать так: $\varepsilon_{эфф} = 0,475\varepsilon + 0,67$.

С учетом этого при отклонении диэлектрической проницаемости подложки имеем $\varepsilon_{эфф} = 0,475k\varepsilon_n + \varepsilon_{эффн}$. Тогда относительное регулярное отклонение эффективной диэлектрической проницаемости

$$b = \frac{0,475\varepsilon_n k}{0,475\varepsilon_n + 0,67}.$$

Данное выражение связывает относительное регулярное отклонение эффективной диэлектрической проницаемости с регулярным отклонением диэлектрической про-

ницаемости материала подложки (рис. 5.17). Изменение волнового сопротивления в результате регулярных отклонений диэлектрической проницаемости можно найти из выражения

$$Z_0 = Z_{0n} / \sqrt{1 - b}, \quad (5.58)$$

где Z_{0n} — номинальное значение волнового сопротивления.

Воспользовавшись выражением, связывающим b и k , можем из (5.58) построить графики, характеризующие изменение волнового сопротивления несимметричной полосковой линии от регулярных отклонений диэлектрической проницаемости подложки при разных значениях ϵ (рис. 5.18).

Для симметричной полосковой линии задача определения приращений волнового сопротивления под влиянием регулярных отклонений диэлектрической проницаемости упрощается тем, что $\epsilon_{эфф} = \epsilon$. Поэтому приращение волнового сопротивления можно найти, взяв полный дифференциал от Z'_0 по ϵ :

$$\Delta Z'_0 = \frac{dZ'_0}{d\epsilon} \Delta \epsilon, \quad (5.59)$$

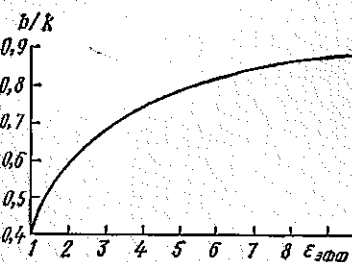


Рис. 5.17. Зависимость относительного регулярного отклонения $\epsilon_{эфф}$ от $\Delta \epsilon$

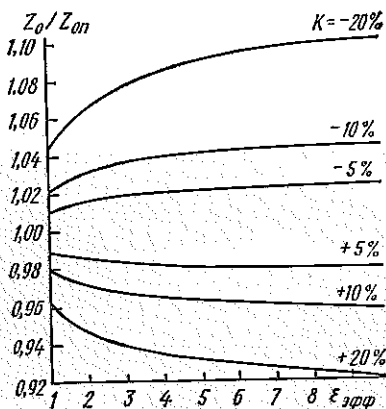


Рис. 5.18. Зависимость изменения волнового сопротивления от $\Delta \epsilon$

откуда

$$\frac{\Delta Z'_0}{Z'_0} = \frac{\Delta \epsilon}{2\epsilon}.$$

Те же результаты нетрудно выразить через КСВН (S_u). Учитывая, что эффективная диэлектрическая проницаемость для несимметричной полосковой линии

$$\epsilon_{эфф} = \frac{\epsilon + 1}{2} + \frac{\epsilon - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 10h/\omega}}, \quad (5.60)$$

при регулярном изменении диэлектрической проницаемости имеем

$$S_u = 1 - \frac{\Delta\epsilon [1 + (1 + 10h/\omega)^{1/2}]}{2[\epsilon + 1 + (\epsilon - 1)(1 + 10h/\omega)^{1/2}]}. \quad (5.61)$$

Для симметричной полосковой линии

$$S_u = \frac{1}{1 - \frac{\Delta\epsilon}{2\epsilon}}. \quad (5.62)$$

Рассмотрим случай, когда отклонения диэлектрической проницаемости регулярны, а в пределах партии изделий случайны. Введем предположение, что значения ϵ для партии подложек распределяются по нормальному закону. Экспериментальные исследования подтверждают правильность этого предположения. Тогда, учитывая, что геометрические размеры полосковых линий также распределяются в пределах партии по нормальному закону, нетрудно показать, что и значения $\epsilon_{эфф}$ будут распределены для партии изделий по нормальному закону.

Таким образом, задача определения закона распределения плотности вероятности волнового сопротивления в партии полосковых линий (симметричных и несимметричных), имеющих регулярные отклонения волнового сопротивления, сводится к нахождению закона распределения выражения

$$Z_0 = Z_{0д} / \sqrt{\epsilon_{эфф}}, \quad (5.63)$$

где $\epsilon_{эфф}$ — случайная величина, подчиненная нормальному закону распределения

$$W(\epsilon_{эфф}) = \frac{1}{\sigma_{\epsilon_{эфф}} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(\epsilon_{эфф} - m_{\epsilon_{эфф}})^2}{2\sigma_{\epsilon_{эфф}}^2} \right\}, \quad (5.64)$$

где $m_{\epsilon_{эфф}}$ — математическое ожидание; $\sigma_{\epsilon_{эфф}}$ — среднее квадратическое отклонение; $Z_0 = f(\epsilon_{эфф})$ — непрерывная, дифференцируемая, монотонно убывающая функция от случайной величины $\epsilon_{эфф}$.

Для убывающей функции плотность вероятности

$$W(Z_0) = -f'[\psi(Z_0)] \psi'(Z_0), \quad (5.65)$$

где $f[\psi(Z_0)]$ — плотность вероятности функции $\psi(Z_0)$; $\psi(Z_0)$ — функция, обратная функции $f(\epsilon_{эфф})$,

$$\epsilon_{эфф} = \psi(Z_0) = \left(\frac{Z_{0д}}{Z_0}\right)^2,$$

$\psi'(Z_0)$ — первая производная по Z_0 .

Подставляя (5.64) в (5.65), получим

$$W(Z_0) = \frac{2Z_{0д}^2}{Z_0^3 \sigma_{эфф} \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{\left[\left(\frac{Z_{0д}}{Z_0}\right)^2 - m_{эфф}\right]^2}{2\sigma_{эфф}^2}. \quad (5.66)$$

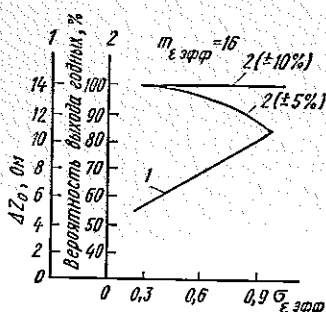


Рис. 5.19. Вероятностные характеристики для партии полосковых линий ($Z_{0н} = 50 \text{ Ом}$) с регулярными погрешностями диэлектрической проницаемости подложки

Воспользовавшись выражением (5.66), можно определить пределы изменения волнового сопротивления ΔZ_0 (рис. 5.19, кривая 1) и вероятность выхода годных изделий при заданном допуске на Z_0 (кривая 2).

В практических конструкциях имеют место и *нерегулярные отклонения* — *непостоянство ϵ в пределах одной платы*. Особенно характерно это для композиционных или vyplненных по керамической технологии диэлектриков. Так как нерегулярные отклонения ϵ случайны по своей природе, их присутствие в линии передачи преобразует ее в статисти-

стически неоднородную линию.

Волновое сопротивление полосковой линии с неоднородным диэлектрическим заполнением

$$Z_n = Z_0 S_u, \quad (5.67)$$

где первый множитель выражает влияние регулярно, а второй — нерегулярного изменения величины диэлектрической проницаемости подложки.

При определении закона распределения S_u неоднородная диэлектрическая подложка полосковой линии представлена в виде совокупности элементарных объемов, однородных по диэлектрической проницаемости. Учитывая, что толщина подложки и ширина полосково-

го проводника малы, изменениями диэлектрической проницаемости по этим размерам можно пренебречь. Тогда имеем полосковую линию с малыми неоднородностями, для которой модуль коэффициента отражения Γ имеет распределение Релея

$$W(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\Gamma_m} \exp \left\{ -\frac{\Gamma^2}{2\Gamma_m^2} \right\},$$

где Γ_m — наиболее вероятное значение коэффициента отражения,

$$\Gamma_m = \sigma_\Gamma \cdot \sqrt{N/2},$$

где N — число неоднородностей.

Найдем распределение коэффициента стоячей волны S_u , учитывая следующее соотношение:

$$S_u = \varphi(\Gamma) = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}.$$

В пределах изменения $\Gamma_0 \div 1$ коэффициент стоячей волны непрерывен и монотонно возрастает. Для монотонно возрастающей функции плотности вероятности

$$W(S_u) = f[\psi(S_u)] \psi'(S_u),$$

где $f[\psi(S_u)]$ — плотность вероятности функции ψ ; $\psi(S_u) = \Gamma = \frac{S_u - 1}{S_u + 1}$ — функция, обратная функции $\varphi(\Gamma)$; $\psi'(S_u)$ — первая производная по S_u .

Отсюда

$$W(S_u) = \frac{2(S_u - 1)}{(S_u + 1)^3 \Gamma_m^2} \exp \left\{ -\frac{(S_u - 1)^2}{2(S_u + 1)^2 \Gamma_m^2} \right\}. \quad (5.68)$$

Плотность распределения величины

$$W(Z_n) = F'(Z_n),$$

где $F'(Z_n)$ — дифференциал функции распределения $F(Z_n)$ по переменной Z_n .

Функция распределения

$$F(Z_n) = \int_c \int f(Z_0, S_u) dS_u dZ_0, \quad (5.69)$$

где $f(Z_0, S_u)$ — плотность вероятности системы случайных величин (Z_0, S_u) , c — область интегрирования.

В (5.69) величина Z_n входит через пределы интегрирования. Зная вид функции $Z_n = \varphi(Z_0, S_u)$, можно разбить пределы интегрирования через Z_n и написать выражение (5.69) в явном виде.

По определению, $F(Z_n) = P(Z_n < Z'_n)$, где $P(Z_n < Z'_n)$ — вероятность события при $Z_n < Z'_n$. Для того чтобы определить $F(Z_n)$, необходимо на плоскости S_u, Z_0 построить кривую, уравнение которой $Z'_n = \varphi(S_u, Z_0)$, и интегрировать по области, для которой $Z_n < Z'_n$. Пределы интегрирования следующие: по переменной $Z_0 = 0 \div Z_n/S_u$, по переменной $S_u = 1 \div \infty$. Формула (5.69) примет вид

$$F(Z_n) = \int_1^{\infty} \int_0^{Z_n/S_u} f(Z_0, S_u) dZ_0 dS_u. \quad (5.70)$$

Дифференцируя (5.70) по Z_n , определим плотности вероятности величины Z_n

$$W(Z_n) = \int_1^{\infty} \left\{ \frac{d}{dZ_n} \int_0^{Z_n/S_u} f(Z_0, S_u) dZ_0 \right\} dS_u = \int_1^{\infty} y dS_u, \quad (5.71)$$

где

$$y = \frac{d}{dZ_n} \int_0^{Z_n/S_u} f(Z_0, S_u) dZ_0. \quad (5.72)$$

Применяя к (5.72) правило Лейбница, получим

$$y = \int_0^{Z_n/S_u} \frac{d}{dZ_n} f(Z_0, S_u) dZ_0 + f(Z_n/S_u, S_u) \frac{d \frac{Z_n}{S_u}}{dZ_n} - \\ - f(0, S_u) \frac{d(0)}{dZ_n} = \frac{1}{S_u} f(Z_n/S_u, S_u). \quad (5.73)$$

Подставляя (5.73) в (5.71), получим

$$W(Z_n) = \int_1^{\infty} \frac{1}{S_u} f(Z_n/S_u, S_u) dS_u. \quad (5.74)$$

Для определения плотности вероятности системы случайных величин $(Z_n/S_u, S_u)$ необходимо выяснить

характер их зависимости. Из (5.66) и (5.68) видно, что закон распределения случайной величины Z_0 не зависит от того, какое значение в данный момент принимает случайная величина S_u , и наоборот, т.е. эти случайные величины являются независимыми.

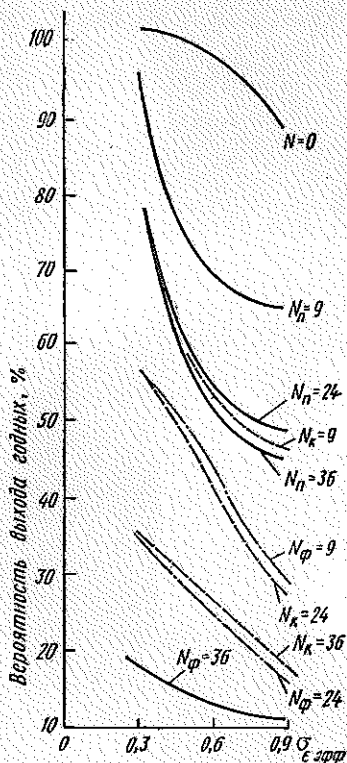


Рис. 5.20. Зависимость вероятности выхода годных МПЛ при допуске на волновое сопротивление $\pm 5\%$ ($Z_{0n} = 50 \text{ Ом}$) от разброса $\epsilon_{\text{эфф}}$

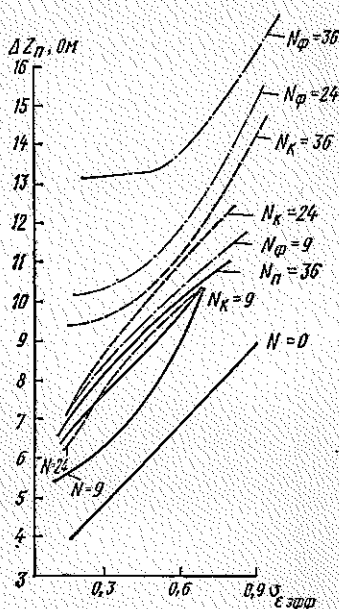


Рис. 5.21. Зависимость вероятности выхода годных МПЛ при допуске на волновое сопротивление $\pm 10\%$ ($Z_{0n} = 50 \text{ Ом}$) от разброса $\epsilon_{\text{эфф}}$

Для независимых непрерывных случайных величин Z_n/S_u и S_u плотность вероятности их системы

$$W(Z_n/S_u, S_u) = f(Z_n/S_u) f(S_u). \quad (5.75)$$

С учетом (5.66), (5.68), (5.75) формулу (5.74) запишем в виде

$$W(Z_n) = \int_1^{\infty} A dS_u, \quad (5.76)$$

где $A = \beta \exp \gamma$

$$\gamma = - \left[\frac{\left(\frac{Z_{0д}^2 S_u^2}{Z_n^2} - m_{\text{эфф}} \right)^2}{2\sigma_{\text{эфф}}^2} + \frac{(S_u - 1)^2}{2(S_u + 1)^2 \Gamma_m^2} \right];$$

$$\beta = \frac{1,6 Z_{0д}^2 S_u^2 (S_u - 1)}{Z_n^3 \sigma_{\text{эфф}}^2 \Gamma_m^2 (S_u + 1)^3}.$$

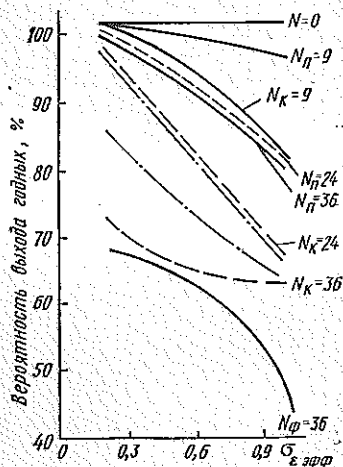


Рис. 5.22. Разброс волнового сопротивления МПЛ, имеющих регулярные и нерегулярные погрешности диэлектрической проницаемости подложки ($Z_{0н} = 50 \text{ Ом}$)

Таким образом, при заданном технологическом процессе изготовления подложек для полосковых линий, характеризующемся определенными погрешностями и допусками на параметры подложек, при помощи формул (5.76) можно определить вероятность того, что значения волнового сопротивления будут соответствовать заданным пределам.

На рис. 5.20—5.22 представлены полученные из (5.76) зависимости вероятности выхода годных изделий при 5- и 10%-ном допуске на волновое сопротивление (рис. 5.20 и 5.21) и разбросе волнового сопротивления (рис. 5.22). На рисунках N_{ϕ} — число неоднородностей в линии на феррите 40СЧ2; N_K — на керамике 22ХС; N_n — на поликоре.

Сравнивая эти зависимости с аналогичными кривыми, характеризующими влияние только регулярных изменений диэлектрической проницаемости подложки, отметим их особенности.

При наличии регулярных и нерегулярных погрешностей диэлектрической проницаемости подложки происходит увеличение дисперсии, уменьшение вероятности выхода годных полосковых линий по сравнению с аналогичными погрешностями для случая только регулярных погрешностей ε подложки. С увеличением числа неоднородностей растет разброс волнового сопротивления, уменьшается вероятность выхода годных полосковых линий. Анализ кривых распределения плотности вероятности показывает также, что они существенно асимметричны и номинальное значение не совпадает с положением их математического ожидания.

Если на волновое сопротивление задан симметричный допуск $Z_{\min} \div Z_{\max}$, то для получения максимальной вероятности попадания значений Z_n в его пределы необходимо, учитывая величину разброса диэлектрической проницаемости подложки, определить новое положение номинального значения, на которое и произвести расчет размеров поперечного сечения полосковой линии. Таким образом, номинальные размеры поперечного сечения полосковой линии определяются допуском на ее волновое сопротивление и разбросом диэлектрической проницаемости подложки. Для решения используем метод оптимума номинала.

Пусть задана область допустимых значений волнового сопротивления, равноценная во всех точках. Воспользовавшись выражением (5.76), получим

$$P = \int_B W(Z_n) d\varepsilon_{эфф}, \quad (5.77)$$

где B — область допустимых значений диэлектрической проницаемости.

Необходимо найти такой вектор $m_0(\varepsilon_{эфф}) \in B$, для которого вероятность, вычисленная из выражения (5.77), была бы максимальной. Так как область B определяется одним зависимым параметром, формулу (5.77) можно записать так:

$$P = \int_{\min \varepsilon_{эфф}}^{\max \varepsilon_{эфф}} W(Z_n) d\varepsilon_{эфф}. \quad (5.78)$$

Примем, что номинал диэлектрической проницаемости есть его математическое ожидание $m_{\varepsilon_{эфф}}$. Сдвиг номинала на величину $\Delta\varepsilon_{эфф}$ вызовет пропорциональный

по величине сдвиг значений волнового сопротивления. Для определения оптимальных номинальных значений параметра $\varepsilon_{эфф}$ возьмем частную производную выражения (5.78) по приращению $\Delta\varepsilon_{эфф}$ и приравняем ее нулю

$$\frac{\partial}{\partial \Delta\varepsilon_{эфф}} \int_{\min \varepsilon_{эфф}}^{\max \varepsilon_{эфф}} W(Z_n) d\varepsilon_{эфф} = 0, \quad (5.79)$$

где $\Delta\varepsilon_{эфф}$ — величина оптимальной поправки математического ожидания эффективной диэлектрической проницаемости $m_{\varepsilon_{эфф}}$.

Из выражения (5.79) можно найти такое значение $\Delta\varepsilon_{эфф}$, при котором выражение (5.78) примет максимальное значение.

Произведя интегрирование, после некоторых преобразований получим

$$\frac{\partial}{\partial \Delta\varepsilon_{эфф}} \left\{ \frac{Z_{0д}^2}{2Z_n^3 \Gamma_m^2} \left[0,059 \exp \left(-\frac{10^{-3}}{\Gamma_m^2} \right) (AB - CD) + \right. \right. \\ \left. \left. + 6 \cdot 10^{-2} \exp \left(-\frac{4 \cdot 10^{-3}}{\Gamma_m^2} \right) (A_1 B_1 - C_1 D_1) \right] \right\} = 0,$$

где

$$\varepsilon_{эфф} = \min \varepsilon_{эфф1}; \quad \varepsilon_{эфф1} + \varepsilon' = \max \varepsilon_{эфф1};$$

$$A = (\varepsilon_{эфф1} + \varepsilon' + \Delta\varepsilon_{эфф}) \frac{0,714}{\sigma_{\varepsilon_{эфф}}} - \frac{0,848 Z_{0д}^2}{Z_n^2 \sigma_{\varepsilon_{эфф}}};$$

$$A_1 = A - \frac{0,15 Z_{0д}^2}{Z_n^2 \sigma_{\varepsilon_{эфф}}};$$

$$B = 1 - \frac{A^2}{3} + \frac{A^4}{10};$$

$$B_1 = 1 - \frac{A_1^2}{3} + \frac{A_1^4}{10};$$

$$C = (\varepsilon_{эфф} + \Delta\varepsilon_{эфф}) \frac{0,714}{\sigma_{\varepsilon_{эфф}}} - \frac{0,848 Z_{0д}^2}{Z_n^2 \sigma_{\varepsilon_{эфф}}};$$

$$C_1 = C - \frac{0,15 Z_{0д}^2}{Z_n^2 \sigma_{\varepsilon_{эфф}}};$$

$$D = 1 - \frac{C^2}{3} + \frac{C^4}{10};$$

$$D_1 = 1 - \frac{C_1^2}{3} + \frac{C_1^4}{10}.$$

Полученное выражение позволяет осуществить технологическую оптимизацию волнового сопротивления полосковой линии при одновременном присутствии регулярных и нерегулярных погрешностей диэлектрической проницаемости.

Оптимальное номинальное значение эффективной диэлектрической проницаемости $m_{0\text{эфф}} = m_{\text{эфф}} + \Delta\epsilon_{\text{эфф}}$. Получить заданное приращение $\Delta\epsilon_{\text{эфф}}$ при известном $m_{\text{эфф}}$ можно путем корректировки ширины полоскового проводника. С учетом (5.16), (5.17)

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{\Delta\epsilon_{\text{эфф}}}{2\epsilon_{\text{эфф}}} \ln \frac{hh}{w}. \quad (5.80)$$

Изменение ширины полоскового проводника Δw приводит к сдвигу и деформации кривой распределения плотности вероятности волнового сопротивления. При этом площадь кривой в пределах поля допуска на волновое сопротивление будет максимальной.

Неоднородность материала подложки является причиной разброса не только их диэлектрической, но и магнитной проницаемости μ .

Произведем оценку погрешности электрических параметров полосковой линии с учетом *регулярных погрешностей первичных параметров, которыми будут относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости и их неоднородности*. Рассмотрим несимметричные полосковые линии — наиболее распространенные в гибридных пленочных устройствах. В качестве анализируемого параметра такой микрополосковой линии возьмем волновое сопротивление Z_{Φ} .

Можно записать, что $Z_{\Phi} = Z_{0\text{д}} \sqrt{\mu_{\text{эфф}}/\epsilon_{\text{эфф}}}$.

Волновое сопротивление Z_{Φ} — функция от двух случайных аргументов — $\epsilon_{\text{эфф}}$, $\mu_{\text{эфф}}$, плотность вероятности одного из них дана формулой (5.60), а второго:

$$W(\mu_{\text{эфф}}) = \frac{1}{\sigma_{\mu_{\text{эфф}}} \sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(\mu_{\text{эфф}} - m_{\mu_{\text{эфф}}})^2}{2\sigma_{\mu_{\text{эфф}}}^2}. \quad (5.81)$$

Плотность распределения функции двух случайных аргументов можно получить по методике, рассмотренной ранее, поэтому ограничимся приведением конечного результата

$$W(Z_{\Phi}) = \int_1^{\infty} \frac{Z_{\Phi} \varepsilon_{\text{эфф}}}{Z_{0д}^2 \sigma_{\mu\text{эфф}} \sigma_{\varepsilon\text{эфф}} \pi} \exp -$$

$$- \left[\frac{\sigma_{\varepsilon\text{эфф}}^2 \left(\frac{Z_{\Phi}^2 \varepsilon_{\text{эфф}}}{Z_{0д}^2} - m_{\mu\text{эфф}} \right) + \sigma_{\mu\text{эфф}}^2 (\varepsilon_{\text{эфф}} - m_{\varepsilon\text{эфф}})^2}{2 (\sigma_{\mu\text{эфф}} \sigma_{\varepsilon\text{эфф}})^2} \right] d\varepsilon_{\text{эфф}}. \quad (5.82)$$

Данное выражение распределения плотности вероятности волнового сопротивления справедливо для случая, когда в партии микрополосковых линий имеется разброс по ε и μ , но в пределах подложки эти параметры строго постоянны (для регулярных погрешностей). На рис. 5.23, 5.24 даны кривые, характеризующие вероятностные параметры партии микрополосковых линий, имеющих регулярные отклонения ε и μ . Они характеризуют величину разброса волнового сопротивления (рис. 5.23), и вероятность выхода годных микрополосковых линий при 10- и 20%-ном допуске на волновое сопротивление (рис. 5.24). Кривые рассчитаны из (5.82) для $Z_{0д} = 200$ Ом; $m_{\varepsilon\text{эфф}} = 16$; $m_{\mu\text{эфф}} = 1$.

Из рисунка видно, что разброс магнитной проницаемости приводит к увеличению пределов изменения волнового сопротивления в 3—7 раз по сравнению с $\sigma_{\mu\text{эфф}} = 0$.

Особенностью МПЛ на намагниченной ферритной подложке является то, что на электрические характеристики такой линии будут влиять еще и конструктивно-технологические погрешности магнитной системы, обеспечивающей рабочее поле требуемой величины и направления. Одним из параметров, характеризующих стабильность магнитных систем, является неоднородность магнитного поля в рабочем зазоре. Основными причинами неоднородности магнитного поля в магнитных системах являются: неточность в изготовлении магнитов, особенно непараллельность торцов, образующих зазор; неодинаковость магнитных свойств магнитов, собирае-

мых в одну систему; неоднородность полей рассеяния отдельных магнитов, собираемых в одну систему.

Существенную роль в разбросе напряженности магнитного поля между полюсами магнитов и его неоднородности играют допуски на изготовление и монтаж магнитной системы.

Поворот торца магнита приводит к повороту вектора магнитной индукции. Неодинаковость магнитных свойств двух магнитов одной системы также приводит

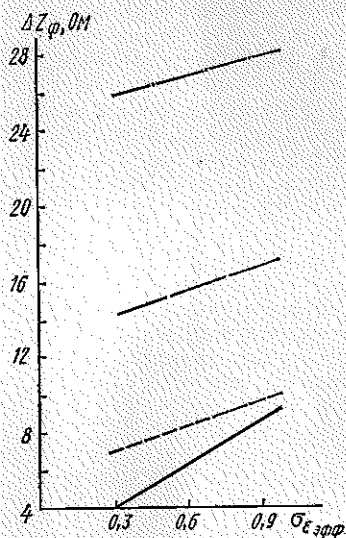


Рис. 5.23. Разброс волнового сопротивления МПЛ, имеющих регулярные погрешности $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$:

- $\sigma\mu_{эфф} = 0,04$;
- · - $\sigma\mu_{эфф} = 0,16$;
- ... $\sigma\mu_{эфф} = 0,08$;
- $\sigma\mu_{эфф} = 0$

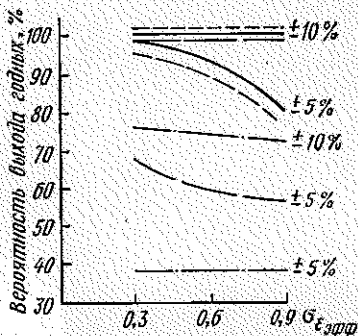


Рис. 5.24. Зависимость вероятности выхода годных МПЛ при допуске на волновое сопротивление ± 5 и $\pm 10\%$ ($Z_{вн} = 50$ Ом) от регулярных отклонений $\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$

к повороту вектора магнитной индукции. При серийном производстве магнитов всегда существует разброс их магнитных свойств. На величину магнитной индукции при больших рабочих зазорах существенно влияют потоки рассеяния от поверхностей магнитов, прилегающих к зазору. Неодинаковость этих потоков обусловлена неодинаковостью геометрических размеров, формы магнитов, формы магнитного поля при термомангнитной обработке магнита и т. д.

В пределах одной магнитной системы существует неоднородность магнитного поля, приводящая к неод-

нородности параметров намагниченного феррита. Следовательно, можно сделать вывод, что серийно изготовляемые постоянные магниты имеют разброс магнитных свойств не только в пределах партии изделий, но и в пределах одного образца; различного рода возмущения, приводящие к изменению вектора магнитной индукции, создают неоднородную структуру магнитного поля в рабочем зазоре; неоднородность постоянного магнитного поля может явиться одной из причин неоднородности компонент тензора магнитной проницаемости K и μ намагниченного феррита, что отразится на нестабильности выходных характеристик микрополосковых устройств на намагниченной ферритной подложке и, следовательно, на их согласовании с микрополосковыми линиями на изотропных подложках.

Проведем анализ влияния регулярной погрешности напряженности подмагничивающего поля на волновое сопротивление МПЛ на поперечно-намагниченной ферритной подложке.

Для этого воспользуемся методом параметрической чувствительности.

Количественной мерой чувствительности характеристик устройств к изменению их параметров являются коэффициенты чувствительности по тому или иному параметру.

В качестве исходного выражения воспользуемся формулой для волнового сопротивления

$$Z = \frac{120\pi \frac{h}{w} \sqrt{\mu/\epsilon}}{1 + \frac{\pi^2}{4k_{2x}} w \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{k_y k}{\mu k_{2x}} \right)^2 \right]}, \quad (5.83)$$

где h и w — конструктивные параметры МПЛ (см. рис. 5.2); $k_y = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\mu\epsilon}$ — постоянная распределения волны в линии; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость феррита; $k_{2x} = \sqrt{\epsilon\mu (k/\mu)^2 + (\lambda/4h)^2}$ — постоянная затухания в поперечном направлении; λ — длина волны

$$\mu = 1 - \frac{MF}{1 - F^2}; \quad K = \frac{M}{1 - F^2}; \quad M = \frac{\omega_m}{\omega};$$

$$F = \frac{\omega_0}{\omega}; \quad \omega_m = \mu_0 \gamma M_0; \quad \omega_0 = \mu_0 \gamma H_i;$$

здесь μ и K — компоненты тензора магнитной проницаемости намагниченного феррита; M_0 — намагниченность насыщения; H_i — напряженность внутреннего подмагничивающего поля; ω — циклическая частота;

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}; \quad \gamma = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ К/кг.}$$

Определим коэффициенты чувствительности волнового сопротивления Z по параметрам K и μ :

$$A_{Z,K} = \frac{\partial Z}{\partial K} \cdot \frac{K}{Z} \quad \text{и} \quad A_{Z,\mu} = \frac{\partial Z}{\partial \mu} \cdot \frac{\mu}{Z}.$$

Продифференцировав по K и μ и подставив полученные выражения, получим

$$A_{Z,K} = - \frac{120\pi \frac{h}{\omega} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left[C(K, \mu) \frac{\partial B}{\partial K} + B(K, \mu) \frac{\partial C}{\partial K} \right] K}{Z [1 + B(K, \mu) C(K, \mu)]^2}; \quad (5.84)$$

$$A_{Z,\mu} = - \frac{120\pi \frac{h}{\omega} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left[\frac{1}{2\mu} \{1 + B(K, \mu) C(K, \mu)\} - \left(C \frac{\partial B}{\partial \mu} + B \frac{\partial C}{\partial \mu} \right) \right] \mu}{[1 + B(K, \mu) C(K, \mu)]^2},$$

где

$$B(K, \mu) = \frac{\pi^2}{4\omega K_{2x}}; \quad C(K, \mu) = 1 - \frac{(k_y K)^2}{2(\mu K_{2x})^2}.$$

При малых отклонениях параметров K и μ выражения для относительной погрешности волнового сопротивления, вызванной погрешностями K и μ , можно записать так:

$$\Delta Z/Z = A_{Z,K} \frac{\Delta K}{K}; \quad \Delta Z/Z = A_{Z,\mu} \frac{\Delta \mu}{\mu},$$

где

$$\Delta K/K = A_{K,F} \frac{\Delta F}{F}; \quad \Delta \mu/\mu = A_{\mu,F} \frac{\Delta F}{F}.$$

На рис. 5.25 изображены кривые, характеризующие зависимость волнового сопротивления Z от F , т.е. H_i , для разных геометрических размеров МПЛ. Расчет был произведен для феррита марки 30СЧ3 на длине волны $\lambda = 10$ см.

Кривые рассчитаны: 1 — для $h=1$ и $w=0,5$ мм; 2 — $h=1$, $w=1$ мм; 3 — $h=2$, $w=0,5$ мм; 4 — $h=2$, $w=1$ мм.

На рис. 5.26 и 5.27 показаны зависимости изменения компонент тензора магнитной проницаемости K и μ от изменения внутреннего подмагничивающего поля.

На рис. 5.26 и 5.27 кривые рассчитаны для: 1 — $F=0,5$; 2 — $F=0,25$; 3 — $F=0,2$; 4 — $F=0,1$ мм.

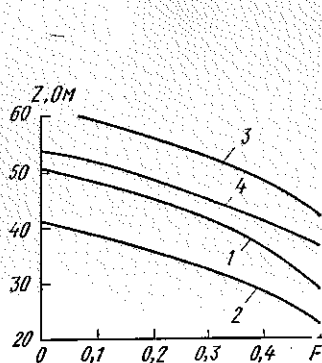


Рис. 5.25. Зависимость волнового сопротивления МПП на поперечно-подмагниченной ферритовой подложке от F

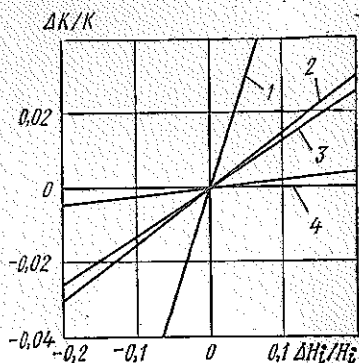


Рис. 5.26. Зависимость изменения компоненты тензора магнитной проницаемости K от напряженности внутреннего подмагничивающего поля

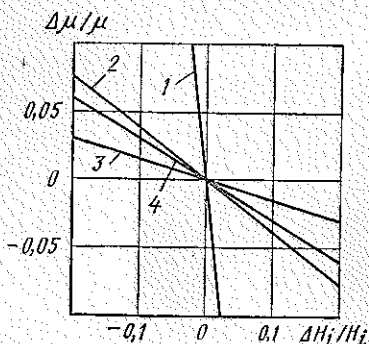


Рис. 5.27. Зависимость изменения компоненты тензора магнитной проницаемости μ от напряженности внутреннего подмагничивающего поля

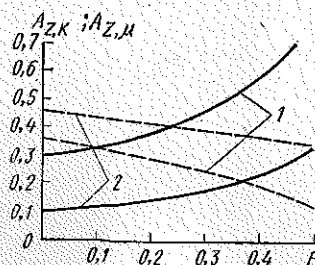


Рис. 5.28. Зависимости коэффициентов чувствительности $A_{z,K}$ и $A_{z,\mu}$ от параметра F

Из анализа кривых (см. рис. 5.26 и 5.27) видно, что с увеличением F , т.е. при больших подмагничивающих полях, степень влияния изменения подмагничивающего поля на K и μ увеличивается.

На рис. 5.28 показаны зависимости коэффициентов чувствительности $A_{z,k}$ и $A_{z,\mu}$ от F для разных геометрических размеров. Сплошные кривые соответствуют $A_{z,k}$, штриховые — $A_{z,\mu}$. Кривые рассчитаны: 1 — для $h=3$ и $h/w=5$; 2 — $h=2$ мм и $h/w=1$.

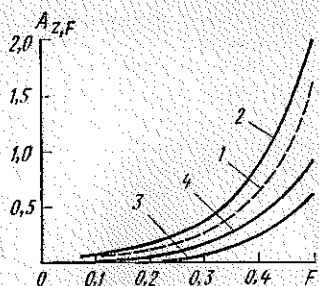


Рис. 5.29. Зависимость $A_{z,F}$ от F

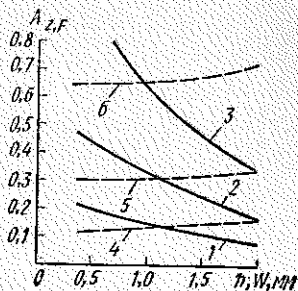


Рис. 5.30. Зависимость $A_{z,F}$ от размеров МПЛ

Определим коэффициент чувствительности волнового сопротивления по параметру F :

$$A_{z,F} = 120\pi \frac{F}{Z} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \times \left\{ \frac{\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial F} [1 + \varphi(F)f(F)] - \left[f(F) \frac{d\varphi}{dF} + \varphi(F) \frac{df}{dF} \right]}{[1 + \varphi(F)f(F)]^2} \right\}, \quad (5.85)$$

где

$$\varphi(F) = \frac{\pi^2}{4k_{2x}(F)\omega}; \quad f(F) = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{k_y(F)K(F)}{k_{2x}(F)\mu(F)} \right]^2.$$

На рис. 5.29 изображены кривые, характеризующие зависимость $|A_{z,F}|$ от F , рассчитанные для разных h и ω . Кривые 1—4 рассчитаны для тех же геометрических размеров, что и кривые, показанные на рис. 5.25. При больших подмагничивающих полях чувствительность Z к изменению F больше.

На рис. 5.30 приведены зависимости $|A_{z,F}|$ от h и ω

при фиксированных F . Сплошные кривые соответствуют зависимости от h , а штриховые — от w ; 1 и 4 рассчитаны для $F=0,2$; 2 и 5 — для $F=0,3$; 3 и 6 — для $F=0,4$ мм.

Из рис. 5.31 видно, что $A|_{Z,F}$ в большей степени зависит от h . Из этого следует, что для расчета Z

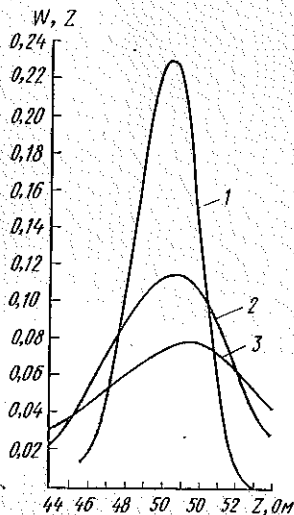


Рис. 5.31. Распределение плотности вероятности волнового сопротивления МПЛ на поперечно-подмагниченной ферритовой подложке

в следующем виде:

$$W(Z) = W[F(Z)] \left| \frac{dF(Z)}{dZ} \right|,$$

где $F(Z)$ — обратная функция $Z(F)$; $W(Z)$ — дифференциальная функция распределения волнового сопротивления.

Получить обратную функцию $F(Z)$ аналитически сложно, поэтому вместо $\left| \frac{dF(Z)}{dZ} \right|$ используем соотно-

шение $1 \left| \frac{dZ}{dF} \right|$, тогда запишем

$$W[Z(F)] = W(F) \left| 1 \left/ \frac{dZ}{dF} \right| \right|.$$

с минимальным $|A_{Z,F}|$ желательно варьировать шириной полоскового проводника w , задавшись максимально возможной величиной h .

Рассмотрим партию МПЛ на поперечно-подмагниченной ферритной подложке, в которой величина подмагничивающего поля изменяется от образца к образцу, а геометрические размеры постоянны. Определим статистические характеристики волнового сопротивления.

В качестве исходного выражения для анализа воспользуемся формулой для волнового сопротивления МПЛ на поперечно-намагниченной ферритовой подложке (5.83).

Как известно, дифференциальную функцию распределения функции одной случайной величины можно записать

Продифференцировав по F , найдем формулу для дифференциальной функции распределения волнового сопротивления

$$W[Z(F)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_F} \exp\left[-\frac{(F-\bar{F})^2}{2\sigma_F^2}\right] \times \\ \times \frac{[1 + \varphi(F)f(Z)]^2}{120\pi \frac{\mu}{\varepsilon} \frac{h}{w} \left\{ \frac{1}{2\mu} \frac{d\mu}{dF} [1 + \varphi(F)f(F)] - \left[\frac{d\varphi}{dF} f(F) + \frac{df}{dF} \varphi(F) \right] \right\}}, \quad (5.86)$$

где

$$\varphi(F) = \frac{\pi^2}{4k_{2x}(F)w}; \quad f(F) = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{k_y(F)K(F)}{k_{2x}(F)\mu(F)} \right]^2.$$

Интегральную функцию распределения можно записать в следующем виде:

$$\Psi(Z) = \int_{-\infty}^Z W(Z) dZ = \int_{-\infty}^F W(F) dF. \quad (5.87)$$

Взаимосвязь между F и Z осуществляется при помощи формулы (5.83).

На рис. 5.31 изображено семейство кривых, характеризующих дифференциальную функцию распределения, рассчитанных по формуле (5.86) для разных среднеквадратичных отклонений. Расчет был произведен для $h=2$ мм, $w=0,4$ мм, $F=0,41$, что соответствует 50-омной МПЛ. Кривые соответствуют: 1 — $\sigma_F/F=0,1$; 2 — $\sigma_F/F=0,2$; 3 — $\sigma_F/F=0,3$. Из анализа кривых видно, что кривые распределения асимметричны.

На рис. 5.32 представлено семейство интегральных функций распределения, рассчитанных по (5.87). Кривые соответствуют: 1 — $\sigma_F/\bar{F}=0,1$; 2 — $\sigma_F/\bar{F}=0,2$; 3 — $\sigma_F/\bar{F}=0,3$. По этим кривым можно определить вероятность попадания волнового сопротивления в заданные пределы.

На их основе была определена зависимость вероятности выхода годных изделий от σ_F при разных допусках на волновое сопротивление. Эти кривые изображены на рис. 5.33. Кривые соответствуют: 1—5; 2—10; 3—20%-ному допуску на волновое сопротивление.

Для учета *нерегулярных погрешностей параметров материала подложки* (ε и μ) воспользуемся формулой

$$Z_{n\Phi} = Z_{\Phi} S_{\mu}, \quad (5.88)$$

где $Z_{нф}$ — волновое сопротивление микрополосковой линии на подложке с неоднородным ϵ и μ ; S_u — коэффициент стоячей волны, характеризующий собой влияние нерегулярных погрешностей параметров подложки.

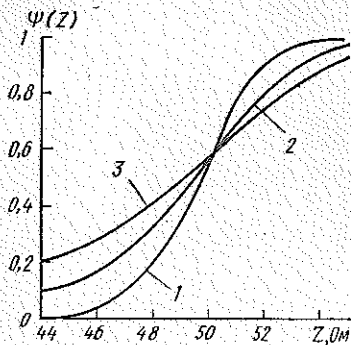


Рис. 5.32. Семейство интегральных функций распределения

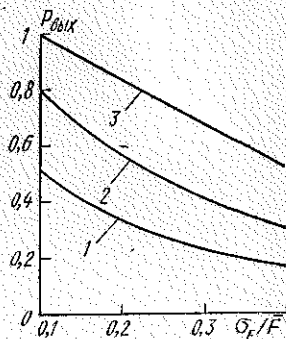


Рис. 5.33. Зависимость вероятности выхода годных МПЛ на поперечно-подмагниченной подложке от σ_F

Плотность вероятности случайной величины $Z_{нф}$ имеет вид

$$f(Z_{нф}) = \int_1^{\infty} \left\{ \frac{2(S_u - 1)}{S_u(S_u + 1)^3 \Gamma_m^2} \exp - \right. \\ \left. - \frac{(S_u - 1)^3}{2\Gamma_m^2(S_u + 1)^2} \int_1^{\infty} \frac{Z_{нф}}{S_u Z_{0д}^2} \frac{\epsilon_{эфф}}{\sigma_{мэфф} \sigma_{эфф} \pi} \exp - \right. \\ \left. - \left[\frac{\sigma_{эфф}^2 \left(\frac{Z_{нф}^2 \epsilon_{эфф}}{S_u^2 Z_{0д}^2} - m_{мэфф} \right)^2}{2(\sigma_{мэфф} \sigma_{эфф})^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\sigma_{мэфф}^2 (\epsilon_{эфф} - m_{эфф})^2}{2(\sigma_{мэфф} \sigma_{эфф})^2} \right] d\epsilon_{эфф} \right\} dS_u. \quad (5.89)$$

При расчетах следует учитывать, что $\Gamma_m = \sigma_F \sqrt{N/2}$, где N — число неоднородностей, а Γ_m — математическое ожидание коэффициента отражения.

Формула (5.89) показывает плотность распределения волнового сопротивления микрополосковой линии с учетом одновременного присутствия регулярного и нерегулярного разброса диэлектрической и магнитной проницаемости.

При помощи формулы (5.89) можно определить вероятность того, что значения волнового сопротивления будут соответствовать заданным пределам и произвести технологическую оптимизацию конструкции МПЛ по критерию максимальной вероятности выхода годных.

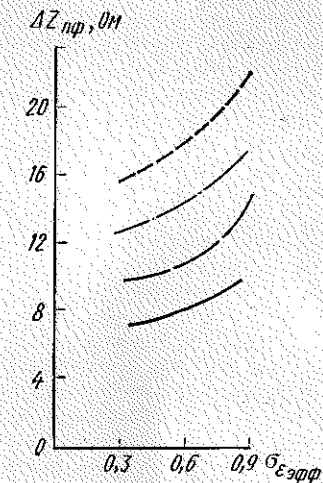


Рис. 5.34. Разброс волнового сопротивления МПЛ в зависимости от $\sigma_{\epsilon_{\text{эфф}}}$ при $\sigma_{\mu_{\text{эфф}}} = 0,04$; $m_{\epsilon_{\text{эфф}}} = 16$; $m_{\mu_{\text{эфф}}} = 1$;

— $N=0$; — $N=21$;
- - - $N=9$; — $N=36$

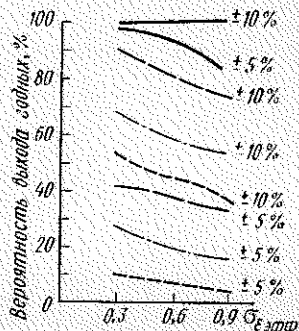


Рис. 5.35. Вероятность выхода годных МПЛ в зависимости от $\sigma_{\epsilon_{\text{эфф}}}$ для ± 5 и $\pm 10\%$ допуска на волновое сопротивление при $\sigma_{\mu_{\text{эфф}}} = 0,04$; $m_{\epsilon_{\text{эфф}}} = 16$; $m_{\mu_{\text{эфф}}} = 1$

На рис. 5.34, 5.35 даны кривые, характеризующие величину разброса волнового сопротивления (рис. 5.34) и вероятность выхода годных микрополосковых линий (рис. 5.35). Из кривых видно, что по сравнению со случаем $N=0$ разброс значений волнового сопротивления существенно увеличится при наличии нерегулярных погрешностей диэлектрической и магнитной проницаемости подложки. Кривые плотности вероятности волнового сопротивления микрополосковой линии при этом асимметричны. По сравнению со случаем $N=0$ асимметрия увеличилась в четыре раза.

Чтобы произвести технологическую оптимизацию конструкции МПЛ по критерию максимальной вероятности выхода годных, определим поправку для номинального значения диэлектрической проницаемости. Затем, зная ее величину, перейдем к эквивалентному изменению ширины полоскового проводника. Опуская промежуточные вычисления, для расчета поправки $\Delta\epsilon_{эфф}$ можно записать следующее выражение:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta\epsilon_{эфф}} \cdot \frac{Z_{n\Phi}}{2Z_{0д} \sigma_{\muэфф} \sigma_{\epsilonэфф} \pi} \left[\left(1 - \frac{A^2}{3}\right)(A - B)(C_0 + 0,228C_1) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{A_1^2}{3}\right)(A_1 - B_1)(4,56C_2 + 3,27C_3) + \right. \\ \left. + \left(1 - \frac{A_2^2}{3}\right)(A_2 - B_2)(4,33C_4 + 3,11C_5) \right] = 0, \quad (5.90)$$

где использованы обозначения:

$$(\epsilon_{эфф} + \epsilon' + \Delta\epsilon_{эфф}) \frac{0,714}{\sigma_{эфф}} - \frac{0,7}{\sigma_{эфф}} = A;$$

$$A - \frac{6,3}{\sigma_{эфф}} = A_1; \quad A - \frac{12,6}{\sigma_{эфф}} = A_3;$$

$$B - \frac{6,3}{\sigma_{эфф}} = B_1; \quad B - \frac{12,6}{\sigma_{эфф}} = B_2;$$

$$(\epsilon_{эфф} + \Delta\epsilon_{эфф}) \frac{0,714}{\sigma_{эфф}} - \frac{0,7}{\sigma_{эфф}} = B;$$

$$C_i = \sigma_{эфф} \exp \left[-\frac{M \cdot 10^{-3}}{\Gamma_m^2} - \frac{\left(\frac{K Z_{n\Phi}^2}{1,44} \cdot \frac{1}{Z_{0д}} - m_{\muэфф} \right)^2}{2\sigma_{\muэфф}^2} \right]; \\ i = 0 - 5.$$

Для C_0 значения $M=1$, $K=1$; $C_1 - M=4$, $K=1$; $C_2 - M=1$, $K=8,25$; $C_3 - M=4$, $K=6,94$; $C_4 - M=1$, $K=15,7$; $C_5 - M=4$, $K=13,2$.

Продифференцировав (5.90) при конкретных численных значениях входящих в нее величин $\Delta\epsilon_{эфф}$, можно определить поправку $\epsilon_{эфф}$. Значение поправки необходимо подставить в формулу (5.90) и найти величину $\Delta\omega/\omega$ — относительную поправку на ширину проводни-

ка микрополосковой линии. Оптимальное значение ширины полоскового проводника $m_{0w}=m_w+\Delta w$, где m_w — номинальное значение ширины полоскового проводника, адекватное математическому ожиданию.

При использовании в расчетах оптимального номинального значения ширины полоскового проводника вероятность нахождения волнового сопротивления в требуемых пределах будет максимальной.

§ 5.4. Совместное влияние конструктивно-технологических погрешностей

В предыдущих разделах данной главы было показано, как влияют различные конструктивно-технологические погрешности на вероятностные характеристики волнового сопротивления, потери, КСВН симметричной и несимметричной полосковых линий. При рассмотрении влияния каждой конкретной погрешности предполагалось, что других погрешностей в линии не существует. В практических конструкциях, как правило, присутствуют все рассмотренные конструктивно-технологические погрешности одновременно и вероятностные параметры электрических характеристик полосковых линий определяются их совокупным влиянием. Определим закон распределения волнового сопротивления полосковой линии, выполненной на материале с неоднородной диэлектрической и магнитной проницаемостью и имеющей разброс геометрических размеров. Для этого воспользуемся выражением

$$Z_0 = Z_{0д} \sqrt{\mu_{эфф}/\epsilon_{эфф}}.$$

Известно, что для случайной величины, которая является дифференцируемой функцией системы случайных величин $(x_1, \dots, x_n)$, плотность вероятности может быть найдена так:

$$W(Y) = \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty}}_{n-1} f(\Psi, x_2, \dots, x_n) \left| \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right| dx_2, \dots, dx_n,$$

где $\Psi = x_1 = \varphi(y, x_2, \dots, x_n)$.

Для $n=3$ это выражение примет вид

$$W(Z_0) = \int_1^{\infty} \int f(Z_{0d} = Z_0 \sqrt{\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф}}; \mu_{эфф}; \epsilon_{эфф}) \times \\ \times \sqrt{\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф}} d\mu_{эфф} d\epsilon_{эфф}.$$

Если погрешности геометрических размеров, диэлектрической и магнитной проницаемости регулярны, то с учетом (5.19), (5.64) и (5.81) получим

$$W(Z_0) = \int_1^{\infty} \int \frac{8g\epsilon_{эфф}}{\pi\sigma_{эфф}\sigma_{эфф}\mu_{эфф}} \cdot \frac{\gamma_1\gamma_2 \exp(2Z_0\pi\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})}{64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2\exp(4Z_0\pi\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})} \times \\ \times \left\{ 1 + 1,25 \frac{8\gamma_1^2 + \gamma_2^2 \exp(2Z_0\pi\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})}{[64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2 \exp(4Z_0\pi\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})]^{1/2}\gamma_1\gamma_2} \right\} \times \\ \times \exp - \left\{ \frac{[8g - \exp(2Z_0\pi\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})]^2}{2[64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2 \exp(4\pi Z_0\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф})]} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_{эфф}^2(\mu_{эфф} - m_{эфф})^2 + \sigma_{эфф}^2(\epsilon_{эфф} - m_{эфф})^2}{2(\sigma_{эфф}\sigma_{эфф})^2} \right\} d\mu_{эфф} d\epsilon_{эфф}. \quad (5.91)$$

Для случая полосковой линии на диэлектрической подложке это выражение примет вид

$$W(Z_0) = \int_1^{\infty} f(Z_{0d} = Z_0 \sqrt{\epsilon_{эфф}}; \epsilon_{эфф}) \sqrt{\epsilon_{эфф}} d\epsilon_{эфф}$$

и может быть записано так:

$$W(Z_0) = \int_1^{\infty} \frac{16g\epsilon_{эфф}}{\sigma_{эфф}\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\gamma_1\gamma_2 \exp(2\pi Z_0\epsilon_{эфф})}{64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2 \exp(4\pi Z_0\epsilon_{эфф})} \times \\ \times \left\{ 1 + 1,25 \frac{8\gamma_1^2 + \gamma_2^2 \exp(2\pi Z_0\epsilon_{эфф})}{\gamma_1\gamma_2[64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2 \exp(4\pi Z_0\epsilon_{эфф})]^{1/2}} \right\} \times \\ \times \exp - \left\{ \frac{[8g - \exp(2\pi Z_0\epsilon_{эфф})]^2}{2[64\gamma_1^2g^2 + \gamma_2^2 \exp(4\pi Z_0\epsilon_{эфф})]} + \right. \\ \left. + \frac{(\epsilon_{эфф} - m_{эфф})^2}{2\sigma_{эфф}^2} \right\} d\epsilon_{эфф}. \quad (5.92)$$

На рис. 5.36, *a—в* приведены вероятностные характеристики для партии полосковых линий, имеющих регулярное отклонение геометрических размеров $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,05$; $g=1$ и параметров материала подложки. Показаны пределы изменения Z_0 (см. рис. 5.36) и ожидаемый процент выхода годных при 5- и 10%-ном допуске на Z_0 (рис. 5,36) при $Z_{0n}=50$ Ом.

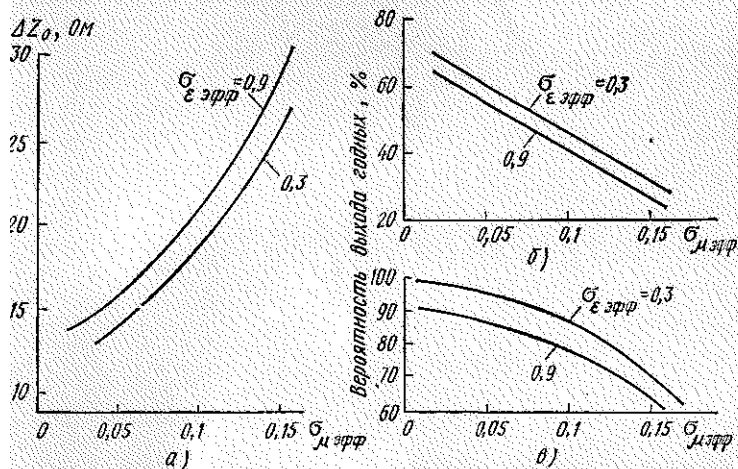


Рис. 5.36. Вероятностные характеристики для партии микрополосковых линий, имеющих регулярные погрешности

При оценке степени влияния дефектов границы проводника, нерегулярных отклонений геометрических размеров и свойств материала подложки полосковых линий ($\epsilon_{эфф}$ и $\mu_{эфф}$) примем предположения, что величины вызванных ими неоднородностей малы, а отражения от неоднородностей независимы и аддитивны. Тогда можно использовать выражение

$$Z_{\Sigma\Phi} = Z_0 S_u \quad (5.93)$$

В (5.93) $Z_{\Sigma\Phi}$ — волновое сопротивление полосковой линии с учетом неоднородностей ширины полоскового проводника, материала подложки и регулярного разброса геометрических размеров, диэлектрической, магнитной проницаемостей материала подложки; значение S_u — коэффициент стоячей волны, характеризующий

собой появление отраженных волн при наличии нерегулярных погрешностей в виде неоднородности электрических и магнитных параметров подложки, разброса ширины полоскового проводника в пределах одной линии.

Основываясь на принятых предположениях и учитывая сказанное ранее, можно заключить, что распределение модуля коэффициента отражения на входе линии при совокупном влиянии нерегулярных отклонений подчиняется закону Релея.

Если дана случайная величина, которая является дифференцируемой функцией четырех случайных величин, то плотность вероятности случайной функции после некоторых преобразований определим по формуле

$$W(Z_{\Sigma\Phi}) = \int_1^\infty \int f(Z_{0д} = \frac{Z_{\Sigma\Phi}}{S_u} \sqrt{\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф}}, \\ \mu_{эфф} \epsilon_{эфф} S_u) \frac{1}{S_u} \sqrt{\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф}} d\mu_{эфф} d\epsilon_{эфф} dS_u,$$

где $f(Z_{0д} = \frac{Z_{\Sigma\Phi}}{S_u} \sqrt{\epsilon_{эфф}/\mu_{эфф}} \mu_{эфф} \epsilon_{эфф}, S_u)$ — плотность вероятности системы случайных величин. Используя (5.34), (5.39), (5.64), (5.81), получим окончательное выражение плотности вероятности волнового сопротивления полосковых линий на неоднородной подложке с учетом разброса μ :

$$W(Z_{\Sigma\Phi}) = \int_1^\infty \int \frac{16g\epsilon_{эфф}(S_u - 1)}{S_u \pi \sigma_{\mu_{эфф}} \sigma_{\epsilon_{эфф}} \mu_{эфф} (S_u + 1)^3 \Gamma_m^2} \times \\ \times \frac{\gamma_1 \gamma_2 \exp\left(\frac{2Z_{\Sigma\Phi} \pi \epsilon_{эфф}}{S_u \mu_{эфф}}\right)}{64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{4Z_{\Sigma\Phi} \pi \epsilon_{эфф}}{S_u \mu_{эфф}}\right)} \times \\ \times \left\{ 1 + 1,25 \frac{8\gamma_1^2 + \gamma_2 \exp\left(\frac{2Z_{\Sigma\Phi} \pi \epsilon_{эфф}}{S_u \mu_{эфф}}\right)}{\gamma_1 \gamma_2 \left[64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp\left(\frac{4Z_{\Sigma\Phi} \pi \epsilon_{эфф}}{S_u \mu_{эфф}}\right)\right]^{1/2}} \right\} \times$$

$$\times \exp - \left[\frac{(S_u - 1)^2}{2(S_u + 1)^2 \Gamma_m^2} + \frac{\left[8g - \exp \left(\frac{2Z_{\Sigma\Phi} \pi}{S_u} \frac{\varepsilon_{\Phi\Phi}}{\mu_{\Phi\Phi}} \right) \right]^2}{2 \left[64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp \left(\frac{4Z_{\Sigma\Phi} \pi}{S_u} \frac{\varepsilon_{\Phi\Phi}}{\mu_{\Phi\Phi}} \right) \right]} + \right. \\ \left. + \frac{\sigma_{\varepsilon\Phi\Phi}^2 (\mu_{\varepsilon\Phi\Phi} - m_{\mu\varepsilon\Phi\Phi})^2 + \sigma_{\mu\varepsilon\Phi\Phi}^2 (\varepsilon_{\mu\Phi\Phi} - m_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi})^2}{2(\sigma_{\mu\varepsilon\Phi\Phi} \sigma_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi})^2} \right] \times \\ \times d\mu_{\varepsilon\Phi\Phi} d\varepsilon_{\varepsilon\Phi\Phi} dS_u. \quad (5.94)$$

Для полосковых линий на неоднородной диэлектрической подложке без учета разброса μ

$$W(Z_{\Sigma D}) = \int_1^\infty \int \frac{32g\varepsilon_{\varepsilon\Phi\Phi}(S_u - 1)}{S_u \sigma_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi} \sqrt{2\pi(S_u + 1)^3 \Gamma_m^2}} \times \\ \times \frac{\gamma_1 \gamma_2 \exp \left(2\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right)}{64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp \left(4\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right)} \times \\ \times \left\{ 1 + 1,25 \frac{8\gamma_1^2 + \gamma_2^2 \exp \left(2\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right)}{\gamma_1 \gamma_2 \left[64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp \left(4\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right) \right]^{1/2}} \right\} \times \\ \times \exp - \left[\frac{\left[8g - \exp \left(2\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right) \right]^2}{2 \left[64\gamma_1^2 g^2 + \gamma_2^2 \exp \left(4\pi \frac{Z_{\Sigma D}}{S_u} \varepsilon_{\Phi\Phi} \right) \right]} + \right. \\ \left. + \frac{(\varepsilon_{\varepsilon\Phi\Phi} - m_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi})^2}{2\sigma_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi}^2} + \frac{(S_u - 1)^2}{2(S_u + 1)^2 \Gamma_m^2} \right] d\varepsilon_{\varepsilon\Phi\Phi} dS_u. \quad (5.95)$$

На рис. 5.37 даны кривые распределения плотности вероятности волнового сопротивления при совокупном воздействии регулярных и нерегулярных погрешностей. Они построены из (5.94) для $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,05$; $g = 1$; $\sigma_{\varepsilon\varepsilon\Phi\Phi} = 0,3$; $\sigma_{\mu\varepsilon\Phi\Phi} = 0,04$, различного числа дефектов грани-

цы N . При расчетах полагалось, что распределение глубины дефектов подчиняется нормальному закону, для которого $\pm 3\sigma = 5$ мкм. Кривые построены для наиболее употребимых материалов подложек: 1 — поликора; 2 — керамики ГМ; 3 — 22ХС; 4 — немагнитного феррита 40СЧ2.

Количество неоднородностей N , для которого произведены расчеты, характеризуется штрихами при цифро-

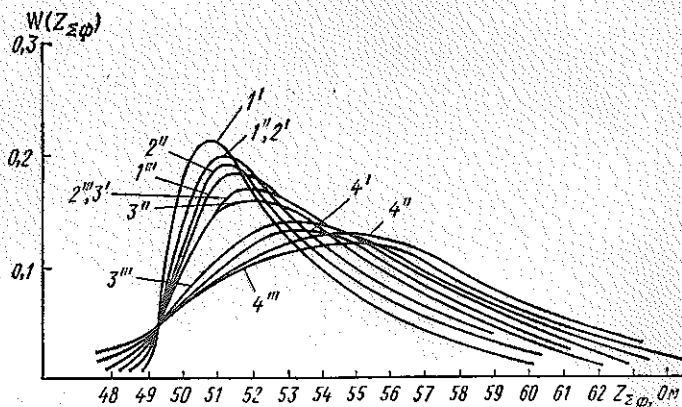


Рис. 5.37. Кривые распределения плотности вероятности волнового сопротивления при совокупном воздействии регулярных и нерегулярных погрешностей

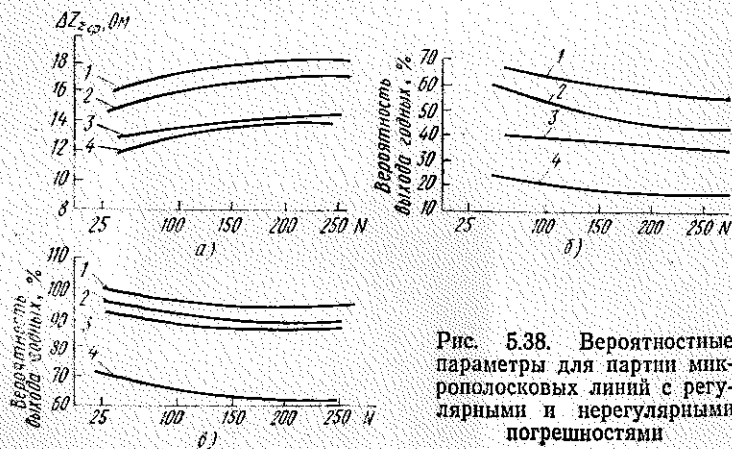


Рис. 5.38. Вероятностные параметры для партии микрополосковых линий с регулярными и нерегулярными погрешностями

вом индексе кривой. Один штрих — 25 неоднородностей, два — 100, три — 250.

На рис. 5.38, *а* приведены вероятностные параметры для партии полосковых линий, имеющих совокупные регулярные и нерегулярные погрешности. Они построены для тех же условий, что и кривые рис. 5.37 при допуске $\pm 5\%$ (рис. 5.38, *б*) и $\pm 10\%$ (рис. 5.38, *в*) на $Z_0 = 50$ Ом.

Сравнение данных кривых с результатами, полученными для полосковой линии, имеющей только регулярные погрешности, показывает, что появление нерегулярных погрешностей резко ухудшает параметры партии полосковых линий. Увеличивается разброс значений волнового сопротивления и уменьшается вероятность выхода годных.

Глава 6

АНАЛИЗ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИС СВЧ

На основе микрополосковых линий передачи созданы разнообразные функциональные элементы ГИС СВЧ. Соединение отрезков микрополосковых линий с определенной электрической длиной и волновым сопротивлением позволяет создавать трансформаторы, ненаправленные и направленные делители мощности, шлейфные и кольцевые направленные ответвители. Так как основным элементом конструкций для этих устройств является микрополосковая линия, очевидно, что погрешности ее электрических параметров будут определять и погрешности электрических параметров перечисленных элементов ГИС СВЧ.

Микрополосковые линии, расположенные в непосредственной близости друг от друга, взаимодействуют между собой краевыми полями. Это используют для создания на их основе направленных ответвителей, фильтров, мостов, делителей мощности и т. д. При технологической оптимизации этих элементов необходимо учитывать и свойства области связи.

Включение полупроводниковых структур в МПЛ делает необходимым учет взаимного влияния разбросов электрических параметров МПЛ и полупроводниковой структуры при проведении их технологической оптимизации.

Рассмотрим способы технологической оптимизации наиболее типичных из перечисленных элементов ГИС СВЧ.

§ 6.1. Четвертьволновые согласующие переходы на МПЛ

В устройствах ГИС СВЧ иногда необходимо осуществлять согласование элементов с различными волновыми сопротивлениями. Для этого обычно используются

ступенчатые переходы, простейшим из которых является отрезок линии длиной $l = \lambda/4$ с волновым сопротивлением $Z_n = \sqrt{Z_1 Z_2}$, где λ_0 — длина волны в линии; Z_1 и Z_2 — номинальные значения волновых сопротивлений согласуемых элементов ГИС СВЧ. Для данного отрезка характерны все конструктивно-технологические погрешности, присущие МПЛ. Волновое сопротивление Z_n — это случайная величина, характеризующаяся функцией распределения плотности вероятности $W(Z_n)$. Как показано в гл. 5, функция распределения хорошо аппроксимируется смещенной функцией Релея, которая представлена на рис. 6.1:

$$W(Z_n) = \begin{cases} \frac{Z_n - Z'_n}{\sigma_Z^2} \exp \left[-\frac{(Z_n - Z'_n)^2}{2\sigma_Z^2} \right] & \text{при } Z_n \geq Z'_n \\ 0 & \text{при } Z_n < Z'_n \end{cases} \quad (6.1)$$

здесь σ_Z^2 — дисперсия волнового сопротивления, величина которой зависит от используемых материалов и вида технологического процесса; Z'_n — величина сдвига, определяющая положение функции распределения на оси Z_n .

При технологической оптимизации конструкции перехода в условиях устойчивого технологического процесса необходимо найти значение Z'_n , при котором вероятность выхода годных переходов для заданной σ_Z была бы максимальной. Для этого определим область допустимых значений Z_n , исходя из критерия непревышения модулем коэффициента отражения от входа перехода заданной максимальной величины $|\Gamma|_{\max}$:

$$|\Gamma| = \left| \Gamma_{Z_2} e^{2 \frac{2\pi}{\lambda_0} l} + \Gamma_{Z_n} \right|,$$

где Γ_{Z_2} и Γ_{Z_n} — коэффициент отражения от скачков волновых сопротивлений $Z_n \rightarrow Z_2$ и $Z_1 \rightarrow Z_n$.

Будем считать, что длина перехода постоянна и $l = \lambda_0/4$, тогда

$$\begin{aligned} |\Gamma| &= |\Gamma_{Z_2} - \Gamma_{Z_n}| = \\ &= \left| \frac{1 - Z_n/Z_1}{1 + Z_n/Z_1} - \frac{1 - Z_2/Z_n}{1 + Z_2/Z_n} \right| = 2 \frac{|Z_2/Z_n - Z_n/Z_1|}{1 + Z_2/Z_n + Z_n/Z_1 + Z_2/Z_1}. \end{aligned}$$

Решим следующее неравенство:

$$2 \frac{|Z_2/Z_n - Z_n/Z_1|}{1 + Z_2/Z_n + Z_n/Z_1 + Z_2/Z_1} \leq |\Gamma|_{\max}.$$

Проведя несложные преобразования и учитывая, что $Z_n > 0$, получим

$$Z_{n\min} = Z_1 \frac{\sqrt{\left[\frac{|\Gamma|_{\max}}{2} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \right]^2 - 4 \frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{|\Gamma|_{\max}^2}{4} - 1 \right)} - \frac{2 + |\Gamma|_{\max}}{2 + |\Gamma|_{\max}} - \frac{\frac{|\Gamma|_{\max}}{2} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)}{2 + |\Gamma|_{\max}}; \quad (6.2)$$

$$Z_{n\max} = Z_1 \frac{\sqrt{\left[\frac{|\Gamma|_{\max}}{2} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \right]^2 - 4 \frac{Z_2}{Z_1} \left(\frac{|\Gamma|_{\max}^2}{4} - 1 \right)} + \frac{2 - |\Gamma|_{\max}}{2 - |\Gamma|_{\max}} + \frac{\frac{|\Gamma|_{\max}}{2} \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right)}{2 - |\Gamma|_{\max}}.$$

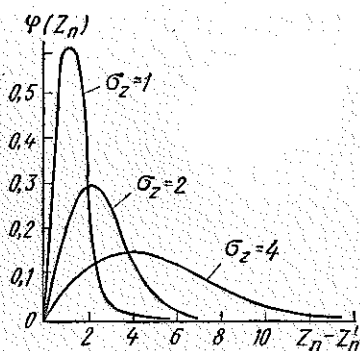


Рис. 6.1. Смешенная функция распределения Релея

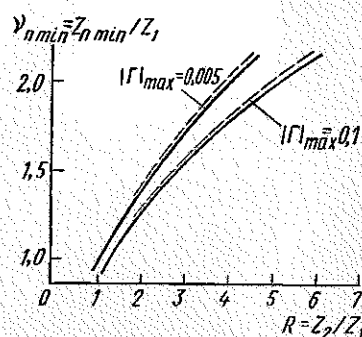


Рис. 6.2. Зависимости $Z_n/Z_{\min} \times (Z_2/Z_1)$, полученные по точным (сплошная линия) и приближенным (пунктир) формулам

Для достаточно малых $|\Gamma|_{\max}$ можно получить приближенные формулы:

$$Z_{n\min} = \sqrt{Z_1 Z_2} (1 - |\Gamma|_{\max});$$

$$Z_{n\max} = \sqrt{Z_1 Z_2} (1 + |\Gamma|_{\max}). \quad (6.3)$$

На рис. 6.2 даны графики Z_n/Z_1 (Z_2/Z_1), выполненные по формулам (6.2) и (6.3), из которых видно, что даже для $|\Gamma|_{\max}=0,1$ ошибка не превышает 2%. Обычно же $|\Gamma|_{\max}<0,05$. Выражения (6.2) и (6.3) определяют область работоспособности перехода D_{Zn} . Вероятность выхода годных для перехода P — это вероятность попадания случайной величины Z_n в эту область

$$P = \int_{Z_{n\min}}^{Z_{n\max}} W(Z_n) dZ_n. \quad (6.4)$$

Рассмотрим случай, когда Z_1 и Z_2 — постоянные величины, что имеет место при раздельном изготовлении согласующего перехода и линий.

Для упрощения формул введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} v_1 &= Z_1/Z_1 = 1; \quad v_n = Z_n/Z_1; \quad R = Z_2/Z_1; \\ v'_n &= Z'_n/Z_1; \quad \sigma_{vn} = \sigma_{Zn}/Z_1. \end{aligned} \quad (6.5)$$

С учетом (6.1), (6.3) и (6.5) выражение (6.4) можно записать так:

$$P = \begin{cases} \int_{\sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max})}^{\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})} \frac{v_n - v'_n}{\sigma_{vn}^2} \exp \left[-\frac{(v_n - v'_n)^2}{2\sigma_{vn}^2} \right] dv_n & \text{для } v_n \geq v'_n \\ 0 & \text{для } v_n < v'_n. \end{cases}$$

Произведя интегрирование, получим

$$P = \begin{cases} \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max}) - v'_n]^2}{2\sigma_{vn}^2} \right] - \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}) - v'_n]^2}{2\sigma_{vn}^2} \right] & \text{при } v'_n \leq \\ & \leq \sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max}) \\ 1 - \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}) - v'_n]^2}{2\sigma_{vn}^2} \right] & \text{при } \sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}) > v'_n > \sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max}) \\ 0 & \text{при } v'_n > \sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}). \end{cases} \quad (6.6)$$

На рис. 6.3 дан график зависимости $P(v'_n)$ при различных $|\Gamma|_{\max}$, σ_{v_n} , $\sqrt{R}$.

Найдем соотношение v'_n и $\sqrt{R}$, при котором вероятность выхода годных максимальна. Для этого произведем дифференцирование (6.6) по v'_n

$$\frac{dP}{dv'_n} = \left\{ \begin{array}{l} \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max})-v'_n]^2}{2\sigma_{v_n}^2} \right] \times \\ \times \frac{\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})-v'_n}{\sigma_{v_n}^2} - \\ - \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})-v'_n]^2}{2\sigma_{v_n}^2} \right] \times \\ \times \frac{\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})-v'_n}{\sigma_{v_n}^2} \\ \text{при } v'_n \leq \sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max}) \\ - \exp \left[-\frac{[\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})-v'_n]^2}{2\sigma_{v_n}^2} \right] \times \\ \times \frac{\sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})-v'_n}{\sigma_{v_n}^2} \\ \text{при } \sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}) > v'_n > \sqrt{R}(1-|\Gamma|_{\max}) \\ 0 \quad \text{при } v'_n > \sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max}). \end{array} \right.$$

Область $v'_n > \sqrt{R}(1+|\Gamma|_{\max})$ следует исключить, так как вероятность работоспособности в ней равна нулю. Из условия экстремума $dP/dv'_n = 0$ следует

$$\exp \left[\frac{(\sqrt{R} + \sqrt{R} |\Gamma|_{\max} - v'_n)^2 - (\sqrt{R} - \sqrt{R} |\Gamma|_{\max} - v'_n)^2}{2\sigma_{v_n}^2} \right] = \frac{\sqrt{R} + \sqrt{R} |\Gamma|_{\max} - v'_n}{\sqrt{R} - \sqrt{R} |\Gamma|_{\max} - v'_n}. \quad (6.7)$$

Решая уравнение (6.7), получим график зависимости $v'_n(\sqrt{R})$, представленный на рис. 6.4. Уравнение

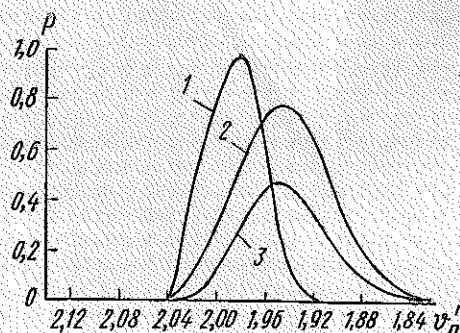


Рис. 6.3. Распределение вероятности $P(v_n')$; кривые построены:

1 — для $\sqrt{R}=2$; $|\Gamma|_{\max}=0.02$; $\sigma_{v_n}=0.02$; 2 — $\sqrt{R}=2$; $|\Gamma|_{\max}=0.02$; $\sigma_{v_n}=0.05$;
3 — $\sqrt{R}=2$; $|\Gamma|_{\max}=0.01$; $\sigma_{v_n}=0.05$

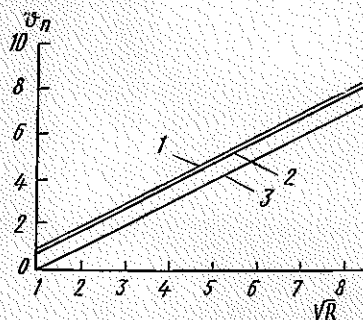


Рис. 6.4. Зависимость $v_n'(\sqrt{R})$; кривые построены:

1 — для $|\Gamma|_{\max}=0.02$; $\sigma_{v_n}=0.05$; 2 — $|\Gamma|_{\max}=0.01$; $\sigma_{v_n}=0.01$; 3 — $|\Gamma|_{\max}=0.01$; $\sigma_{v_n}=0.1$

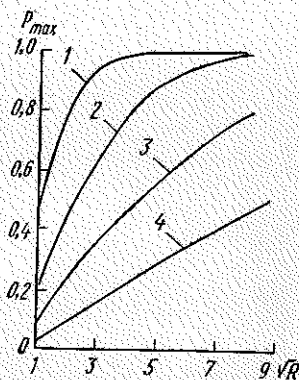


Рис. 6.5. Зависимость максимально достижимой вероятности выхода годных от перепада волновых сопротивлений согласуемых линий; кривые построены:

1 — для $|\Gamma|_{\max}=0.02$; $\sigma_{v_n}=0.05$; 2 — $|\Gamma|_{\max}=0.01$; $\sigma_{v_n}=0.05$; 3 — $|\Gamma|_{\max}=0.02$; $\sigma_{v_n}=0.1$; 4 — $|\Gamma|_{\max}=0.01$; $\sigma_{v_n}=0.1$

(6.7) решалось численными методами. Приближенно функцию $v'_n(\sqrt{R})$ можно записать в следующем виде:

$$v'_n = \begin{cases} \sqrt{R}(1 - |\Gamma|_{\max}) \text{ при } \sqrt{R} > 30 \frac{\sigma_{vn}^2}{|\Gamma|_{\max}} \\ \sqrt{R}(1 - |\Gamma|_{\max} - 7\sigma_{vn}^2) \text{ при } 1 < \sqrt{R} < 30 \frac{\sigma_{vn}^2}{|\Gamma|_{\max}} \end{cases} \quad (6.8)$$

Погрешность данной формулы составляет 1—2%.

Подставляя (6.8) в (6.6), получим зависимость максимально достижимой вероятности выхода годных от перепада волновых сопротивлений согласуемых линий на частоте f_0 . Из графика $P_{\max}(\sqrt{R})$ рис. 6.5 видно, что с увеличением $\sqrt{R}$ вероятность выхода годных для согласующего перехода возрастает и приближается к единице. Это объясняется тем, что с увеличением $\sqrt{R}$ относительное изменение v'_n становится незначительным. Вероятность выхода годных зависит также от σ_{vn} , а следовательно, и от Z_1 .

Рассмотрим случай, когда при согласовании МПЛ с различными волновыми сопротивлениями имеет место единый технологический процесс изготовления согласуемых микрополосковых линий и согласующего перехода на одной подложке. При этом случайными являются не только Z_n , но и Z_1 , Z_2 . Вследствие того что условия изготовления МПЛ с волновыми сопротивлениями Z_1 , Z_n и Z_2 можно считать одинаковыми из-за небольшой площади обрабатываемой поверхности, отклонения волновых сопротивлений будут одинаковыми по величине. При этом величины Z_1 , Z_n и Z_2 можно представить в следующем виде:

$$Z_1 = Z'_1 + \delta; \quad Z_n = Z'_n + \delta; \quad Z_2 = Z'_2 + \delta, \quad (6.9)$$

где δ — случайная величина с законом распределения

$$W(\delta) = \frac{\delta}{\sigma_Z^2} \exp \left[-\frac{\delta^2}{2\sigma_Z^2} \right].$$

По аналогии с (6.8) найдем область допустимых значений δ . Для этого формулу (6.3) запишем с учетом (6.9)

$$\begin{aligned} \sqrt{(Z'_1 + \delta)(Z'_2 + \delta)}(1 - |\Gamma|_{\max}) &< Z'_n + \\ + \delta &< \sqrt{(Z'_1 + \delta)(Z'_2 + \delta)}(1 + |\Gamma|_{\max}). \end{aligned}$$

Разделив правую и левую части неравенства на Z'_1 , получим

$$\begin{aligned} \sqrt{(1 + \delta')(R + \delta')}(1 - |\Gamma|_{\max}) &< v'_n + \\ + \delta' &< \sqrt{(1 + \delta')(R + \delta')}(1 + |\Gamma|_{\max}), \end{aligned}$$

где

$$R = Z'_2/Z'_1; \quad \delta' = \delta/Z'_1; \quad v'_n = Z'_n/Z'_1.$$

Произведя дальнейшие преобразования, найдем

$$(1 - |\Gamma|_{\max})^2 < \frac{v_n'^2 + 2v_n'\delta' + \delta^2}{R + (R+1)\delta + \delta^2} < (1 + |\Gamma|_{\max})^2. \quad (6.10)$$

Так как $|\Gamma|_{\max} < 0,1$, то можно воспользоваться приближенной формулой

$$\begin{aligned} (1 - |\Gamma|_{\max})^2 &= 1 - 2|\Gamma|_{\max}; \\ (1 + |\Gamma|_{\max})^2 &= 1 + 2|\Gamma|_{\max}. \end{aligned}$$

Членом δ^2 в выражении (6.10) можно пренебречь, так как обычно $Z'_1 \gg \delta$, и $Z'^2 \ll \delta'$. В результате имеем неравенство

$$1 - 2|\Gamma|_{\max} < \frac{v_n'^2 + 2v_n'\delta'}{R + (R+1)\delta'} < 1 + 2|\Gamma|_{\max}.$$

Решая его относительно δ' и учитывая, что δ' всегда положительна $R > 0$, $v_n' > 0$, получим систему неравенств:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_n'^2 - R(1 - 2|\Gamma|_{\max})}{(1 - 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'} &> \delta' > \\ > \delta' > \frac{v_n'^2 - R(1 + 2|\Gamma|_{\max})}{(1 + 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'}, \\ \frac{(1 + 2|\Gamma|_{\max})(R + 1)}{2} > v_n' > \sqrt{R(1 + 2|\Gamma|_{\max})}. \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

Для такого согласующего перехода найдем вероятность выхода годных. По аналогии с (6.4) ее определя-

ют из условия попадания δ' в область допустимых значений $\delta'_{\min} - \delta'_{\max}$:

$$P = \int_{\delta'_{\min}}^{\delta'_{\max}} W(\delta') d\delta', \quad (6.12)$$

где

$$W(\delta') = W[\delta(\delta')] \left| \frac{d\delta}{d\delta'} \right| = \frac{\delta'}{\sigma_v^2} \exp \left[-\frac{\delta'^2}{2\sigma_v^2} \right];$$

$$\sigma_v = \frac{\sigma_z}{Z_1};$$

$$\delta'_{\max} = \frac{v_n'^2 - R(1 - 2|\Gamma|_{\max})}{(1 - 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'};$$

$$\delta'_{\min} = \frac{v_n'^2 - R(1 + 2|\Gamma|_{\max})}{(1 + 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'}.$$

Интегрируя (6.12), получим

$$P = \exp \left[-\left\{ \frac{v_n'^2 - R(1 + 2|\Gamma|_{\max})}{(1 + 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'} \right\}^2 \frac{1}{2\sigma_v^2} \right] - \\ - \exp \left[-\left\{ \frac{v_n'^2 - R(1 - 2|\Gamma|_{\max})}{(1 - 2|\Gamma|_{\max})(R + 1) - 2v_n'} \right\}^2 \frac{1}{2\sigma_v^2} \right]. \quad (6.13)$$

В качестве примера формула (6.13) просчитывалась для значений $|\Gamma|_{\max} = 0,01$, $\sigma_v = 0,05$, $R = 4$ в зависимости от v_n' . Из графика, представленного на рис. 6.6, видно, что вероятность выхода годных имеет максимум при определенном значении v_n' . Найдем значение v_n' как функцию от R , $|\Gamma|_{\max}$ и σ_v , при котором вероятность выхода годных максимальна. Для этого функцию $P(v_n')$ исследуем на экстремум в области v_n' , удовлетворяющее условию (6.11). Полученные графики даны на рис. 6.7. Пользуясь ими, можно определить значение v_n' , при котором вероятность выхода годных для согласующего перехода максимальна. На рис. 6.8 показана зависимость $P_{\max}$ от R .

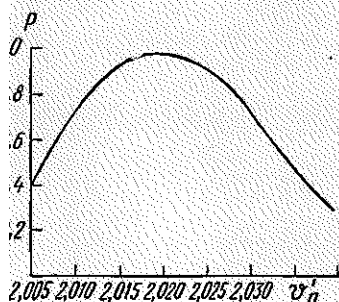


Рис. 6.6. Зависимость вероятности выхода годных переходов от v_n

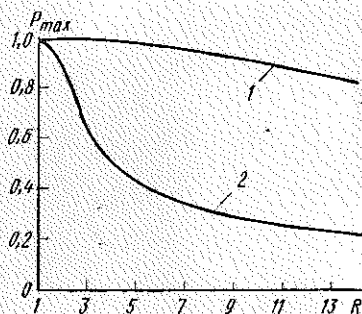


Рис. 6.8. Зависимость максимальной вероятности выхода годных от R ; кривые построены: 1 — для $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=1$; 2 — $|\Gamma|_{\max}=0,02$; $\sigma_v=0,05$; 3 — $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=0,05$

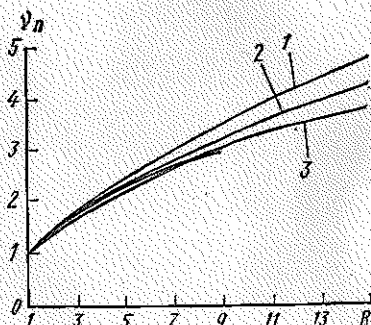


Рис. 6.7. Зависимость значений v_n , при которых вероятность выхода годных максимальна от R , $|\Gamma|_{\max}$ и σ_v ; кривые построены:

1 — для $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=1$; 2 — $|\Gamma|_{\max}=0,02$; $\sigma_v=0,05$; 3 — $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=0,05$

Рис. 6.8. Зависимость максимальной вероятности выхода годных от R ; кривые построены:

1 — для $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=0,05$; 2 — $|\Gamma|_{\max}=0,01$; $\sigma_v=0,1$

§ 6.2. Элементы ГИС СВЧ на связанных линиях

В конструкциях элементов ГИС СВЧ используются микрополосковые линии с распределенной сосредоточенной связью.

Связанные микрополосковые линии с распределенной связью (рис. 6.9) могут служить основой для создания направленных ответвителей, полосовых и направленных фильтров, делителей мощности и т. д. Точность электрических параметров связанных микрополосковых линий с распределенной связью зависит от тех же факторов, что и для одиночной микрополосковой линии. Принятая ранее классификация конструктивно-технологических погрешностей (см. рис. 5.1) является исчерпывающей и в данном случае. Каждая из этих погрешностей имеет случайный характер. Мерой нерегулярных

конструктивно-технологических погрешностей является величина среднеквадратичных нерегулярных отклонений от средних значений по длине связанной микрополосковой линии. Например (рис. 6.10), для зазора и ширины

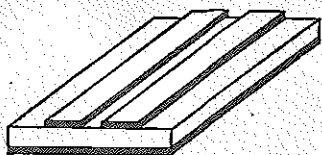


Рис. 6.9. Связанные микрополосковые линии с распределенной связью

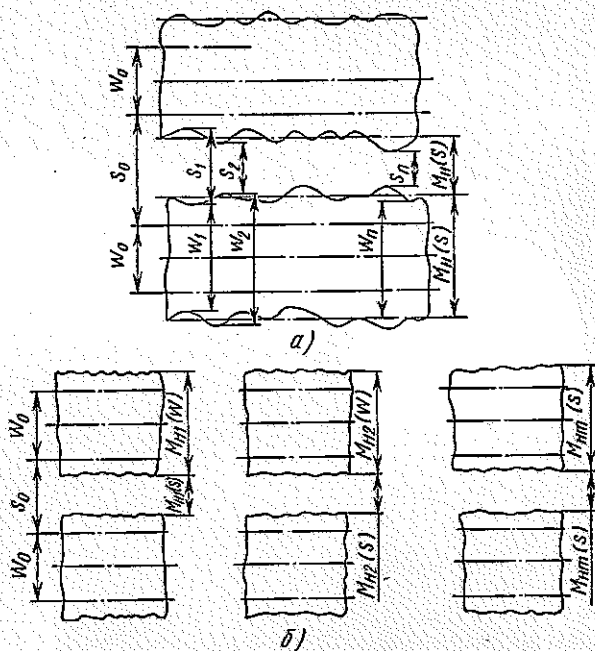


Рис. 6.10. Схема измерений нерегулярных (а) и регулярных (б) погрешностей зазора s и ширины полоскового проводника w

микрополоскового проводника $\sigma_n(s)$ и $\sigma_n(w)$ являются мерой нерегулярных погрешностей, а $M_n(s)$ и $M_n(w)$ представляют собой математические ожидания величины зазора и ширины микрополоскового проводника для каждого из устройств. При стабилизированном технологиче-

ском процессе $\sigma_n(x)$ (где x — конструкционный параметр устройства) — постоянна в партии изделий. Регулярные погрешности представляют собой рассеяние $M_n(x)$ относительно средних величин $M[M_n(x)]$ для партии изделий. Мерой этого рассеяния служат среднеквадратичные регулярные отклонения $\sigma_p[M_n(x)]$. Например (см. рис. 6.10), для зазора и ширины микрополоскового проводника мерой регулярных погрешностей в партии объемом m является $\sigma_p[M_n(s)]$ и $\sigma_p[M_n(w)]$, а общие математические ожидания $M[M_n(s)]$ и $M[M_n(w)]$ определяются путем усреднения $M_{nh}(s)$ и $M_{nh}(w)$, где $k=1, 2, \dots, m$.

Путем коррекции технологических процессов на связанных микрополосковых линиях можно добиться соответствия заданных номинальных значений w и s общим математическим ожиданиям $M[M_n(w)]$ и $M[M_n(s)]$. Исследование погрешностей в области связи показывает, что доминирующими являются регулярные погрешности.

При технологической оптимизации конструкций устройств на связанных МПЛ необходимо знать, как воздействуют погрешности параметров конструкции на ее электрические характеристики. В качестве исследуемого электрического параметра возьмем волновое сопротивление связанных МПЛ

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0e} Z_{00}},$$

которое справедливо при

$$\sqrt[4]{\epsilon_{0e} \epsilon_{00} / \epsilon_{эфф}} = 1,$$

здесь Z_{0e} и Z_{00} — волновые сопротивления при распространении в связанных МПЛ синфазной и противофазной ТЕМ волны соответственно; ϵ_{0e} и ϵ_{00} — диэлектрические проницаемости для синфазной и противофазной ТЕМ волн; $\epsilon_{эфф}$ — эффективная диэлектрическая проницаемость.

Выражение для Z_0 справедливо при использовании связанных симметричных полосковых линий, у которых $\epsilon_{0e} = \epsilon_{00} = \epsilon_{эфф}$.

Для сильносвязанных МПЛ ($s/h=0,05-0,01$) оно дает погрешность 3%, а для слабосвязанных ($s/h=0,8-0,1$) — 1–2%. Найдем коэффициенты влияния для Z_0 .

Особенностью аналитического выражения для МПЛ $Z_0 = \varphi(s/h; w/h; \epsilon_{эфф})$ является неявный вид аргумента h , который входит в значение относительного зазора

s/h и ширины проводника w/h . В связи с этим при определении коэффициентов влияния значение K_w определяется по правилу дифференцирования функционала:

$$\tilde{K}_w = \frac{\partial Z_0(w/h; s/h; \varepsilon_{\text{эфф}})}{\partial (w/h)} \cdot \frac{\partial (w/h)}{\partial w} = \frac{\partial Z_0}{\partial (w/h)} \cdot \frac{1}{h},$$

где $\tilde{K}_w$ — абсолютная величина коэффициента влияния. Аналогично

$$\tilde{K}_s = \frac{\partial Z_0}{\partial (s/h)} \frac{1}{h}.$$

Коэффициент влияния $\tilde{K}_h$ определяется по правилу дифференцирования сложных и неявных функций

$$\begin{aligned} \tilde{K}_h &= \frac{\partial Z_0}{\partial (w/h)} \frac{\partial (w/h)}{\partial h} + \frac{\partial Z_0}{\partial (s/h)} \frac{\partial (s/h)}{\partial h} = \\ &= - \left(\frac{\partial Z_0}{\partial (w/h)} \frac{w}{h^2} + \frac{\partial Z_0}{\partial (s/h)} \frac{s}{h^2} \right). \end{aligned}$$

Сравнивая выражения для коэффициентов влияния можно записать

$$\tilde{K}_h = - \left(\tilde{K} \frac{w}{h} + \tilde{K} \frac{s}{h} \right).$$

Аналогично

$$\tilde{K}_{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \frac{\partial Z_0(w/h; s/h; \varepsilon_{\text{эфф}})}{\partial \varepsilon_{\text{эфф}}}.$$

Отсюда относительные коэффициенты влияния

$$\begin{aligned} K_w &= \frac{\partial Z_0}{\partial (w/h)} \frac{w}{hZ_0}; \quad K_h = - (K_w + K_s); \\ K_s &= \frac{\partial Z_0}{\partial (s/h)} \frac{s}{hZ_0}; \quad K_{\varepsilon_{\text{эфф}}} = \frac{\partial Z_0}{\partial \varepsilon_{\text{эфф}}} \frac{\varepsilon_{\text{эфф}}}{Z_0}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что в данных выражениях w , s , h , $\varepsilon_{\text{эфф}}$ и Z_0 — номинальные значения параметров. Особенностью аналитического выражения Z_0 для связанных симметричных полосковых линий является его разрешимость относительно ε :

$$Z_0 = \frac{Z_{0д}(w/b; s/b)}{\sqrt{\varepsilon}}.$$

Отсюда относительные коэффициенты влияния

$$K = \frac{1}{V_\epsilon} \frac{\partial Z_{0л}}{\partial (s/b)} \frac{w}{bZ_0}; \quad K_h = -(K_w + K_s);$$

$$K_s = \frac{1}{V_\epsilon} \frac{\partial Z_{0л}}{\partial (s/b)} \frac{s}{bZ_0}; \quad K_\epsilon = 1/2.$$

Здесь $b=2h$; $Z_{0л}$ — волновое сопротивление симметричной полосковой линии с воздушным заполнением.

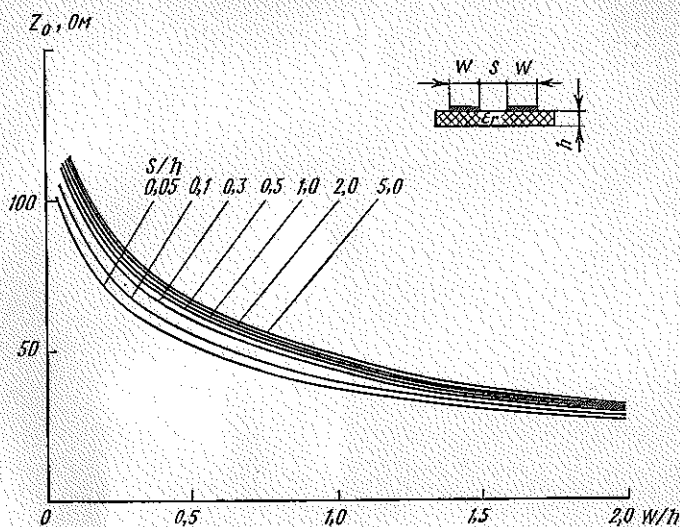


Рис. 6.11. Волновые сопротивления связанных МПЛ ($\epsilon=9,6$)

Получение коэффициентов влияния в общем виде затруднено ввиду громоздкости аналитических выражений. Более приемлем численный метод их нахождения, например, путем расчета промежуточных значений погонных емкостей для четной и нечетной структур поля методом итераций или при помощи графиков рис. 6.11, 6.12.

На рис. 6.13 показаны графики, характеризующие относительные коэффициенты влияния для МПЛ и симметричной полосковой линии.

Учитывая, что конструкционно-технологические погрешности конструктивных параметров Δx_i малы, ре-

зультатирующее приращение волнового сопротивления можно записать так:

$$\frac{\Delta Z_0}{Z_0} \approx K_w \frac{\Delta w}{w} + K_s \frac{\Delta s}{s} + K_h \frac{\Delta h}{h} + K_{\epsilon_{\text{эфф}}} \frac{\Delta \epsilon_{\text{эфф}}}{\epsilon_{\text{эфф}}}.$$

Погрешности $\Delta w/w$, $\Delta h/h$, $\Delta \epsilon_{\text{эфф}}/\epsilon_{\text{эфф}}$ — величины случайные, независимые друг от друга и, как показывают экспериментальные исследования, распределенные по нормальному закону. То же можно сказать и о погрешностях $\Delta s/s$; $\Delta h/h$; $\Delta \epsilon_{\text{эфф}}/\epsilon_{\text{эфф}}$. Погрешности же $\Delta s/s$ и $\Delta w/w$ тесно коррелируют между собой.

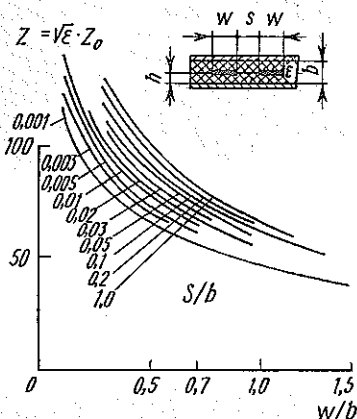


Рис. 6.12. Приведенные волновые сопротивления связанных симметричных полосковых линий

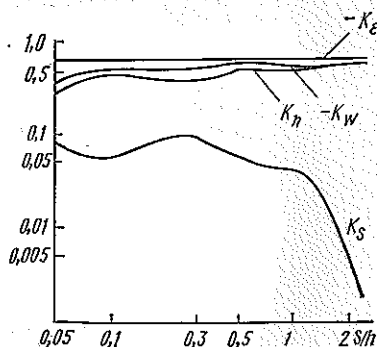


Рис. 6.13. Коэффициенты влияния связанных МПЛ ($\epsilon=9,6$); $Z_0=50 \text{ Ом}$

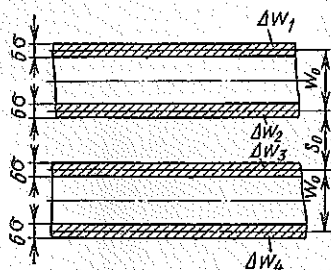


Рис. 6.14. Схема предельных отклонений при регулярных погрешностях s и w

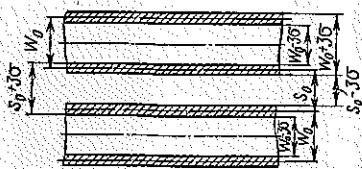


Рис. 6.15. Схема предельных отклонений при регулярных погрешностях s и w и коэффициенте корреляции, равном единице

На рис. 6.14 приведена идеализированная схема регулярных погрешностей связанной линии, построенная в предположении, что приращения ширины каждой из связанных МПЛ распределены по нормальному закону, независимы, имеют дисперсию σ^2 , а номинальные значения

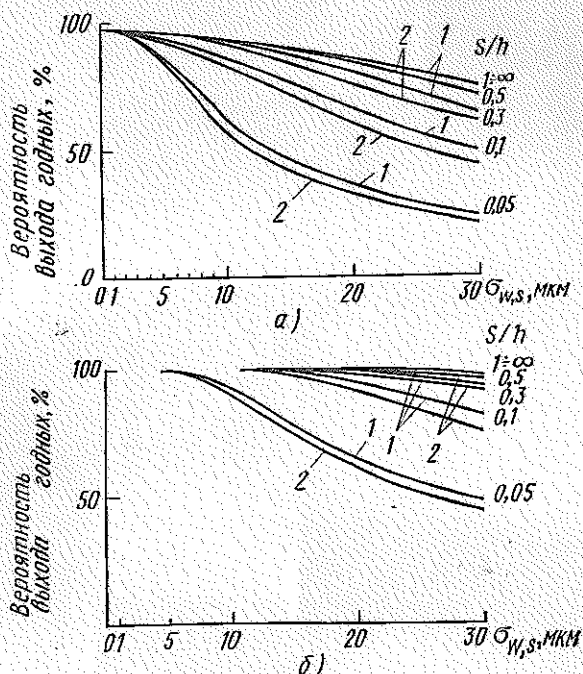


Рис. 6.16. Вероятность выхода годных по Z_0 связанных МПЛ при допуске:

а — ± 5 ; б — $\pm 10\%$

w_0 и s_0 — математические ожидания ширины полоскового проводника и зазора. Отсюда

$$\Delta w = \Delta w_1 + \Delta w_2; \quad \Delta s = -(\Delta w_1 + \Delta w_2).$$

Определим дисперсию функции $K_w \frac{\Delta w}{w} + K_s \frac{\Delta s}{s}$:

$$\begin{aligned} \sigma^2 \left[K_w \frac{\Delta w}{w} + K_s \frac{\Delta s}{s} \right] &= K_w^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta w}{w} \right)^2 + \\ &+ 2K_w K_s \sigma \left(\frac{\Delta w}{w} \right) \sigma \left(\frac{\Delta s}{s} \right) \nu_{w,s} + K_s^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta s}{s} \right)^2. \end{aligned}$$

Здесь $\nu_{w,s}$ — коэффициент корреляции. Нетрудно показать, что он равен $1/2$.

На практике чаще встречается иной случай (рис. 6.15), когда каждая из сторон полоскового проводника смещается на одну и ту же величину. Более того, каждый из связанных полосковых проводников имеет одинаковое изменение ширины. Это является следствием одновременного их формирования в технологическом процессе:

$$\frac{\Delta Z_0}{Z_0} = \tilde{K}_h \Delta h + \tilde{K}_{\epsilon_{\text{эфф}}} \Delta \epsilon_{\text{эфф}} + \tilde{K}_w \Delta w - \tilde{K}_s \Delta s.$$

В данном выражении знак минус перед членом $\tilde{K}_s \Delta s$ учитывает, что положительное приращение Δw вызовет равное по модулю, но противоположное по знаку приращение Δs . Дисперсия для случая МПЛ

$$\begin{aligned} \sigma^2 \left(\frac{\Delta Z_0}{Z_0} \right) &= K_h^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta h}{h} \right) + K_{\epsilon_{\text{эфф}}}^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta \epsilon_{\text{эфф}}}{\epsilon_{\text{эфф}}} \right) + \\ &+ K_w^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta w}{w} \right) + K_s^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta s}{s} \right) - 2K_s K_w \sigma \left(\frac{\Delta w}{w} \right) \sigma \left(\frac{\Delta s}{s} \right). \end{aligned}$$

Здесь коэффициент корреляции между Δw и Δs равен -1 , что говорит о функциональной взаимосвязи этих величин. Для симметричной полосковой линии

$$\begin{aligned} \sigma^2 \left(\frac{\Delta Z_0}{Z_0} \right) &= K_b^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta b}{b} \right) + K_{\epsilon_{\text{эфф}}}^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta \epsilon_{\text{эфф}}}{\epsilon_{\text{эфф}}} \right) + \\ &+ K_w^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta w}{w} \right) + K_s^2 \sigma^2 \left(\frac{\Delta s}{s} \right) - 2K_s K_w \sigma \left(\frac{\Delta w}{w} \right) \sigma \left(\frac{\Delta s}{s} \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \sigma^2 (\Delta b/b) &= \sigma^2 (\Delta b)/b^2; \\ \sigma^2 (\Delta b) &= 2\sigma^2 (\Delta h). \end{aligned}$$

Учитывая, что в правой части выражения для $\Delta Z_0/Z_0$ находим композицию случайных величин, распределенных по нормальному закону. Очевидно, что закон распределения для $\Delta Z_0/Z_0$ также будет нормальным. При чем $M(\Delta Z_0/Z_0) = 0$, так как математические ожидания $\Delta h/h$; $\Delta s/s$; $\Delta w/w$ и $\Delta \epsilon_{\text{эфф}}/\epsilon_{\text{эфф}}$ равны нулю. С учетом этого можно определить значения вероятности выхода годных по Z_0 связанных МПЛ и симметричных полосковых линий при 5- и 10%-ном симметричном допуске (рис. 6.16, кривые 1 и 2).

Учитывая симметрию функции распределения плотности вероятности волнового сопротивления микрополосковых линий с распределенной связью, можно заключить, что технологическая оптимизация в данном случае возможна лишь путем выбора такой точности технологического процесса, при которой себестоимость годных изделий минимальна.

Технологическая себестоимость элемента ГИС СВЧ, как показали экспериментальные исследования, в функции точности может быть записана выражением $s_T = M\sigma_{w,s}^{-N}$. Значения M и N подлежат экспериментальному определению и постоянны для конкретного процесса и условий производства.

Оптимальная технологическая точность будет получена путем нахождения минимума выражения

$$s_T = \frac{M\sigma_{w,s}^{(1-N)} \sqrt{2\pi}}{\int_{\Delta Z_1/Z_0}^{\Delta Z_2/Z_0} e^{Z^2/2\sigma} dZ} \rightarrow \min.$$

Варируются значения $\sigma_{w,s}$. При этом разброс $\Delta s/s$ и $\Delta w/w$ принимается одинаковым, а $\Delta \epsilon_{эфф}/\epsilon_{эфф}$ и $\Delta h/h$ — постоянным для данного материала подложки.

Для функциональных устройств ГИС СВЧ, содержащих связанные резонаторы, необходимо учитывать, что под влиянием конструктивно-технологических погрешностей происходят изменение связи и отклонение резонансных частот резонаторов от расчетных значений. Такими устройствами являются фильтры (рис. 6.17). Они рассчитываются как цепочка звеньев, каждое из которых имеет матрицу передач

$$|t| = \begin{vmatrix} -\frac{(\cos \theta + jZ_0 \sin \theta)^2}{j2r \sin \theta} & -\frac{1 - r^2 \sin^2 \theta}{j2r \sin \theta} \\ \frac{1 - r^2 \sin^2 \theta}{j2r \sin \theta} & \frac{(\cos \theta + jZ_0 \sin \theta)^2}{j2r \sin \theta} \end{vmatrix}, \quad (6.14)$$

где $\theta = 2\pi l/\lambda$; l , λ — длины резонатора и волны; r — сопротивление связи; Z_0 — волновое сопротивление МПЛ.

Число звеньев при расчете берется на одно больше, чем количество резонаторов. Матрица передачи фильтра образуется перемножением матриц звеньев (6.14). Коэффициент затухания фильтра по мощности есть квадрат модуля первого коэффициента результирующей матри-

цы. Величину волнового сопротивления Z_0 и сопротивление связи r определяют с учетом величин волнового сопротивления четного Z_{0e} и нечетного Z_{0o} возбуждений:

$$Z_0 = \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{2};$$

$$r = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{2}.$$

Расстройка резонаторов под действием конструктивных технологических погрешностей ведет к изменению мак-



Рис. 6.17. Фильтр на связанных микрополосковых линиях

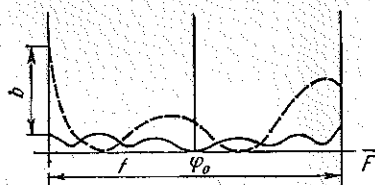


Рис. 6.18. Изменение максимального приращения затухания в полосе прозрачности

симального приращения затухания в полосе прозрачности (рис. 6.18).

При относительной расстройке контуров $x = \Delta f / f$ (где f — ширина полосы пропускания) прирост затухания хорошо аппроксимируется квадратным двучленом

$$b_i = U_i |x_i| + V_i |x_i|^2. \quad (6.15)$$

Значения коэффициентов U и V приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Количество кон- тур	Фильтры с Чебышевской характеристикой						Фильтры с максимально плоской характеристикой					
	<i>U</i>		<i>V</i>		<i>U</i>		<i>V</i>		<i>U</i>		<i>V</i>	
	Номер контура											
	1		2		3		1		1		3	
	1		2		3		1		1		3	
2	0,0376	0,64	—	—	2	—	0,07	0,797	—	—	—	—
3	0,0308	0,95	1,12	3,36	—	—	0,013	0,206	0,552	1,02	—	—
4	0,174	1,65	1,56	6,08	—	—	0,169	0,025	0,526	1,27	—	—
5	0,582	0,184	1,40	7,33	2,06	11,8	0,14	0,069	0,17	1,55	0,873	2,0

Исследования В. Н. Гребнева и Е. А. Алейнера показывают, что прирост затухания n -контурного фильтра при одновременной расстройке всех контуров на величины x_i , с хорошей точностью (погрешность $\leq 3\%$) составляет

$$b = \sum_{i=1}^n b_i = \sum_{i=1}^n (U_i |x_i| + V_i |x_i|^2). \quad (6.16)$$

Считая, что величины x_i независимы, и полагая с учетом сказанного ранее закон их распределения нормальным, а дисперсию одинаковой, имеем

$$W_i(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right),$$

поскольку

$$W_{bi}(b_i) = F[x_i(b_i)] \frac{dx_i}{db_i}.$$

С учетом (6.15) находим

$$|x_i| = \frac{-U_i + \sqrt{U_i^2 + 4b_i V_i}}{2V_i}.$$

Закон распределения величины $|x_i|$ можно записать так

$$W(|x_i|) = \begin{cases} 0 & \text{при } |x_i| < 0 \\ \frac{2}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}\right) & \text{при } |x_i| \geq 0. \end{cases}$$

Тогда закон распределения величины b_i :

$$W_{bi}(b_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma} \sqrt{U_i^2 + 4V_i b_i}} \exp \frac{-(U_i + \sqrt{U_i^2 + 4V_i b_i})^2}{8\sigma^2 V_i^2}. \quad (6.17)$$

Закон распределения $b = \sum b_i$ можно найти путем последовательного взятия сверток от функции $P_{bi}(b_i)$.

На рис. 6.19 приведены функции распределения плотности вероятности величины b . Они хорошо описываются законом Релея. На рис. 6.20 приведены зависимости вероятности выхода годных изделий для различных n и b .

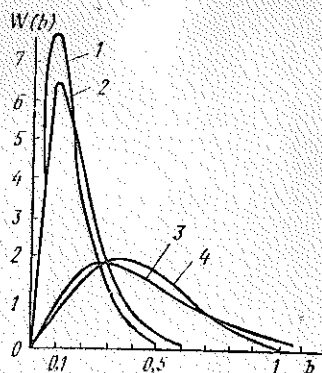


Рис. 6.19. Функции распределения плотности вероятности приращения затухания в полосе прозрачности:

1, 2 — четырех- и пятизвенный фильтр с максимально плоской характеристикой; 3, 4 — четырех- и пятизвенный фильтр с Чебышевской характеристикой

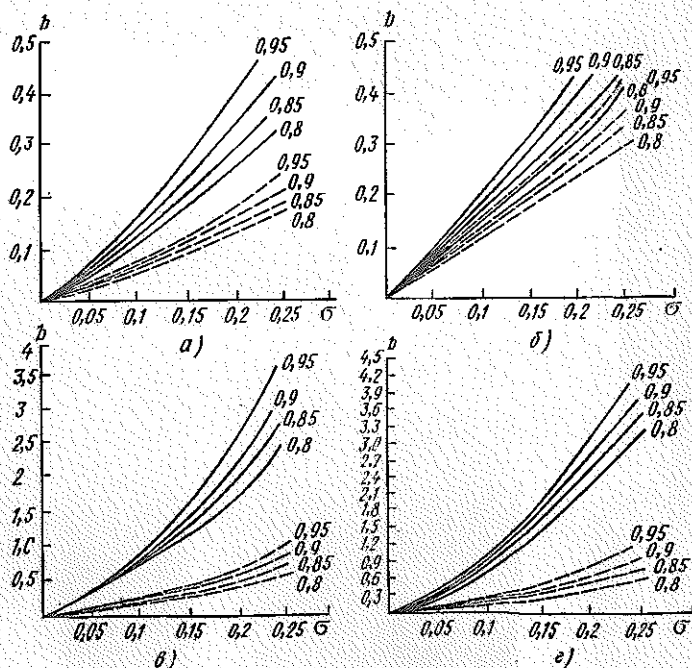


Рис. 6.20. Вероятность выхода годных изделий при различных σ и l
 а — двухконтурные; б — трехконтурные; в — четырехконтурные; г — пятиконтурные фильтры; — — — чебышевские; — — — с максимальной плоской характеристикой

§ 6.3. Элементы ГИС СВЧ с полупроводниковыми структурами

Для ГИС СВЧ, содержащих полупроводниковые структуры, при решении задач анализа и технологической оптимизации необходимо учитывать не только полезности конструктивных параметров, но и разброс свойств полупроводниковых структур, а также их взаимное влияние. В качестве примера рассмотрим решение данной задачи для ГИС СВЧ, содержащих диоды с барьером Шоттки.

Типичными устройствами, выполняемыми на диодах барьером Шоттки, являются СВЧ-смесители и детекторы. Конструкция смесительных или детекторных камер включает диод, цепи согласования и фильтрации СВЧ-сигнала на выходе.

Основными конструктивными вариантами смесительных (детекторных) бескорпусных диодов являются приборы в виде полупроводниковых кристаллов с контактными площадками — «чипы», приборы на керамическом держателе, приборы с гибкими ленточными и провололочными, с балочными выводами. Для каждой схемы в зависимости от ее конструкции, назначения и технологической базы изготовления предпочтительна та или иная конструкция полупроводникового прибора, которая определяет метод и условия монтажа прибора в схему: пайку, термокомпрессию, ультразвуковую сварку и т. д.

Нестабильность технологических режимов при создании полупроводниковой структуры и формировании вытравляющего и омического контактов приводит к разбросу поверхностных и объемных свойств используемых материалов. При сборке диодов возникает неоднозначность длины, формы и положения выводов диода даже при одном варианте конструкции. Неоднозначность положения диода в линии и изменение геометрии его выводов при монтаже в схему, введение укрепляющих и паяльных компаундов, с одной стороны, изменяют параметры эквивалентной схемы диода, а с другой влияют на параметры отрезка микрополосковой линии, где включается диод, так как изменяются геометрия отрезка и емкостные связи в области включения.

Любую указанную конструкцию бескорпусного диода с барьером Шоттки можно представить эквивалентной схемой, приведенной на рис. 6.21. Здесь C_0 — ем-

кость потенциального барьера: $R_{\text{диф}}$ — дифференциальное сопротивление барьера; r_s — последовательное сопротивление; C_n — емкость, появляющаяся при присоединении вывода к диодной структуре; L_n — индуктивность выводов диода.

Введем понятие интегрального элемента (ИЭ), как части СВЧ-устройства, содержащей диод и отрезок МПЛ в месте включения диода (длина отрезка не более $1/4$

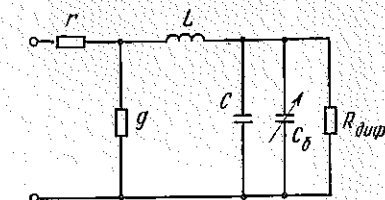
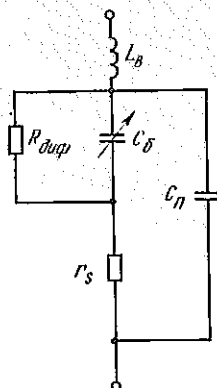


Рис. 6.22. Эквивалентная схема интегрального элемента

← Рис. 6.21. Эквивалентная схема бескорпусного диода

длины волны). Эквивалентная схема ИЭ с коротким замыканием по СВЧ сразу за диодом представлена на рис. 6.22.

Параметры эквивалентной схемы ИЭ включают в себя параметры диода, отрезка МПЛ и параметры, возникающие при монтаже диода в линию передачи, обусловленные его конструктивными особенностями, т. е.

$$\left. \begin{aligned} r &= f(r_s, r'); \\ L &= f(L_n, L'); \\ C &= f(C_n, C', C''); \\ g &= f(g', g''). \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

где обозначения с одним штрихом относятся к параметрам отрезка МПЛ, а с двумя — к параметрам, обусловленным установкой диода в линию.

Таким образом, неоднозначность явлений на границе металл — проводник и в объеме полупроводника, погрешность конструкции диода и монтаж его в линию определяют обязательный разброс параметров ИЭ, т. е. параметры ИЭ имеют случайный характер.

Уместно отметить, что эквивалентная схема ИЭ и замечания о случайном характере параметров ее элементов относятся и к монолитным интегральным схемам МИС), хотя разброс параметров уменьшается за счет дискретности геометрии отрезка МПЛ и отсутствия процессов монтажа диода. Электрические параметры МПЛ, как было показано, также имеют случайный характер (см. гл. 5).

Важной конструкторско-технологической задачей является нахождение математических законов, описывающих плотность распределения параметров импеданса ИЭ и волнового сопротивления МПЛ, а также составление модели оптимального согласования ИЭ (диода) с МПЛ интегральной схемы СВЧ-диапазона для получения максимальной вероятности выхода годных устройств.

Следует отметить, что интегральные методы конструирования и технологии ограничивают подстройку изготовляемых элементов, а при создании МИС полностью снимают возможность подбора согласуемых элементов.

Рассмотрим совокупность точек, отражающих величину входного сопротивления диода на плоскости комплексного переменного как равномерное пуассоновское поле точек с плотностью потока событий λ' .

Из центра круговой диаграммы проведем окружность с произвольным радиусом ρ . Центром диаграммы является точка, где КСВН=1. Для того чтобы расстояние любой точки ρ_i от центра до ближайшей к ней соседней точки было меньше ρ , необходимо попадание в произвольно описанный круг хотя бы одной точки. По свойствам пуассоновского поля вероятность этого события $P(\rho)$ не зависит от того, есть или нет в описанном круге точка.

С учетом условия $\rho > 0$ можно записать

$$F(\rho) = 1 - \exp(-\pi\lambda'\rho^2), \quad (6.19)$$

откуда выражение для плотности вероятности КСВН S_u) имеет вид

$$W(S_u) = 2\pi\lambda'S_u \exp(-\pi\lambda'S_u^2). \quad (6.20)$$

Выражение (6.22) показывает, что кривая распределения КСВН совокупности ИЭ (диодов) описывается законом Релея, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. На рис. 6.23, а, б приведены кривые распределения КСВН S_u и фазы диодов φ_d ,

измеренных в X-диапазоне на тестовой микрополосковой схеме, включающей 50-омную линию и фильтр низкой частоты. Анализ кривых распределения показывает, что разброс параметров входных импедансов у ИЭ с диодами, имеющими вывод — плющенко ($\sigma_{Su}=0,553$, $\sigma_{\varphi_d}=0,086$ при коэффициенте шума $F_n=6,5$ дБ и $\sigma_{Su}=0,60$, $\sigma_{\varphi_d}=0,089$ при $F_n=9$ дБ) меньше, чем у ИЭ с диодами, имеющими вывод — проволочку ($\sigma_{Su}=0,634$; $\sigma_{\varphi_d}=0,093$ при $F_n=6,5$ дБ и $\sigma_{Su}=0,695$; $\sigma_{\varphi_d}=0,096$ при $F_n=9$ дБ).

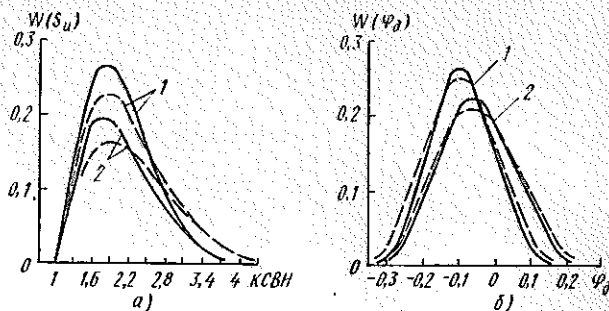


Рис. 6.23. Плотность вероятности для интегрального элемента с диодами:

1 — вывод — плющенко; 2 — вывод — проволочка

С уменьшением предельного значения F_n разброс параметров выходных импедансов падает. Наивероятнейшее значение распределения фазы ИЭ (диодов) остается почти неизменным, а КСВН уменьшается ($S_{um}=1,905$; $\varphi_{dm}=-0,094$ при $F_n=6,5$ дБ и $S_m=2,09$; $\varphi_{dm}=-0,09$ при $F_n=9$ дБ для диодов с плющенко; $S_{um}=1,795$; $\varphi_{dm}=-0,072$ при $F_n=6,5$ дБ и $S_{um}=1,97$; $\varphi_{dm}=-0,07$ при $F_n=9$ дБ для диодов с проволочкой).

Законы распределения параметров импеданса ИЭ диодами, имеющими вывод — плющенко с $F_n=6,5$ дБ представим в аналитическом виде

$$W(S_u) = \frac{S_u - 1}{0,63} \exp \left[-\frac{(S_u - 1)^2}{1,26} \right];$$

$$W(\varphi_d) = 4,08 \exp \left[-\frac{(\varphi_d + 0,072)^2}{0,0184} \right].$$

Наибольший интерес для ГИС СВЧ с полупроводниковыми структурами представляет согласование с короткой МПЛ.

В качестве анализируемого выходного параметра МПЛ рассмотрим волновое сопротивление Z_0 , функционально связанное с диэлектрической проницаемостью ϵ , толщиной диэлектрической подложки h и шириной микрополоскового проводника w . Закон распределения плотности вероятности волнового сопротивления МПЛ дается (5.95).

Составим математическую модель двух последовательно включенных элементов, каждый из которых имеет собственную кривую распределения волнового сопротивления, являющуюся следствием многих случайных причин.

Пусть плотность вероятности волнового сопротивления первого и второго элементов описывается функциями

$$\left. \begin{aligned} W(Z_I) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ W(Z_{II}) &= f(y_1, y_2, \dots, y_n), \end{aligned} \right\}$$

где x_i и y_i — параметры, определяющие разброс Z_I и Z_{II} .

Построив кривые плотности вероятности совместно с равным математическим ожиданием, можем определить их интервал совместного существования Z_1, Z_2 . Так как плотность вероятности совместных событий равна произведению плотности вероятности этих событий, то вероятность годности будет определяться произведением плотностей вероятности $W(Z_I)$ и $W(Z_{II})$ в интервале их совместного существования Z_1 и Z_2 . Вероятность годности можно представить как интеграл вида

$$P_r(Z) = \int_{Z_1}^{Z_2} W(Z_I) W(Z_{II}) dZ.$$

Для нахождения максимальной величины вероятности годности в заданных пределах при помощи аппарата нахождения оптимума номинала необходимо решить систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \Delta m_{ZI}} \int_{Z_1}^{Z_2} W(Z_I, \Delta m_{ZI}) W(Z_{II}, \Delta m_{ZII}) dZ &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial \Delta m_{ZII}} \int_{Z_1}^{Z_2} W(Z_I, \Delta m_{ZI}) W(Z_{II}, \Delta m_{ZII}) dZ &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

где Δm_{Z_I} и $\Delta m_{Z_{II}}$ — сдвиг математических ожиданий.

При реализации двух последовательных элементов (МПЛ и нагрузки) сдвиг математических ожиданий позволяет определить величину волнового сопротивления трансформатора для оптимального согласования элементов $Z_{тр} = m_{Z_I} + \Delta m_{Z_I}$ или $Z_{тр} = m_{Z_{II}} - \Delta m_{Z_{II}}$, где m_{Z_I} и $m_{Z_{II}}$ — математическое

ожидание плотности распределения вероятности элементов, причем $m_{Z_I} < m_{Z_{II}}$.

Найдем вероятность согласования при выполнении следующих условий: $Z_I = Z_{II} \pm \Delta Z_{II}$; $Z_{II} = Z_I \pm \Delta Z_I$.

На практике задают конкретные величины разброса согласуемых параметров. В общем случае, когда допуск на

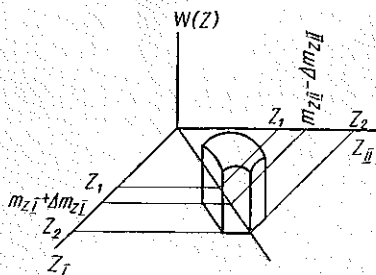


Рис. 6.24. Плотность вероятности годности при условии $Z_I \leq Z_{II} \neq Z_{II} \leq Z_2$

волновое сопротивление каждого элемента различен ($\Delta Z_I = \chi$, $\Delta Z_{II} = \eta$), вероятность годности будет определяться выражением

$$P_r(Z) = \int_0^{\chi+\eta} \int_0^{\chi+\eta} W(Z_I) W(Z_{II}) dZ_I dZ_{II} + \int_{\chi+\eta}^{\infty} \int_{Z_I-(\chi+\eta)}^{Z_I+(\chi+\eta)} W(Z_I) W(Z_{II}) dZ_I dZ_{II}. \quad (6.22)$$

Это выражение показывает, что вероятность согласования волновых сопротивлений (вероятность годности) представляет часть объема двумерного распределения плотности вероятности $P_r(Z)$, находящуюся над полосой шириной $\sqrt{\chi^2 + \eta^2} \cos[\pi/4 - \text{tg}(\chi/\eta)]$ при условии $\chi \leq \eta$ и шириной $\sqrt{\chi^2 + \eta^2} \cos[\pi/4 + \text{tg}(\chi/\eta)]$ при условии $\chi \geq \eta$.

При фиксированных значениях пределов изменений волновых сопротивлений ($Z_I \leq Z_I$, $Z_{II} \leq Z_2$) выражение (6.24) примет вид (рис. 6.24):

$$P_r(Z) = \int_{Z_I}^{Z_I+(\chi+\eta)} \int_{Z_I}^{Z_I+(\chi+\eta)} W(Z_I) W(Z_{II}) dZ_I dZ_{II} +$$

$$+ \int_{Z_1+(\chi+\eta)}^{Z_2} \int_{Z_1-(\chi+\eta)}^{Z_1+(\chi+\eta)} W(Z_I) W(Z_{II}) dZ_I dZ_{II}. \quad (6.23)$$

Исходя из имеющихся кривых распределения плотности вероятности согласуемых элементов и требований, предъявляемых ко всему устройству, можно найти их оптимальное взаимное расположение кривых по критерию максимальной вероятности годности, используя метод оптимума номинала. Такое смещение достигается корректировкой номинальных значений Z при заданных ограничениях на ΔZ и известных вероятностных параметрах кривых распределения.

Представленные выражения (6.24), (6.25) могут быть реализованы при согласовании МПЛ с нагрузкой, являющейся активным сопротивлением.

При включении диода в МПЛ имеет место случай комплексной нагрузки. Воспользуемся плоскостью комплексной переменной единичного радиуса, когда импеданс ИЭ (диода) можно представить через КСВН и фазу. Введем условие, что фаза нагрузки имеет равномерное или симметричное распределение, тогда при проектировании, корректируя электрическую длину линии, можно добиться равенства нулю математического ожидания распределения фазы. Как показали экспериментальные результаты (см. рис. 6.22), это условие выполняется на практике.

Введем понятие эффективного радиуса окружности, охватывающей произвольную совокупность точек импеданса ИЭ:

$$\rho_r = \sqrt{S_{u1}/S_{u2}} \quad (6.24)$$

и эффективного центра данной окружности

$$\rho_0 = \sqrt{S_{u1} S_{u2}}, \quad (6.25)$$

где S_{u1} и S_{u2} — максимальное и минимальные значения КСВН ИЭ.

Допуск на устройство

$$\Delta Z_y = \sqrt{\Delta Z_I^2 + \Delta Z_{II}^2}, \quad (6.26)$$

здесь ΔZ_I — допуск на волновое сопротивление линии; ΔZ_{II} — допуск на входное сопротивление ИЭ, включенного в линию.

Для нахождения условий оптимального согласования (оценки оптимальной величины параметров трансформатора) необходимо решить систему уравнений (6.23). В данном случае, когда кривая распределения волнового сопротивления МПЛ подчиняется нормальному закону и входного сопротивления ИЭ закону Релея, выражение (6.23) имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \Delta m_{ZI}} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{[Z - (m_{ZI} + \Delta m_{ZI})]^2}{2\sigma^2} \right\} \times \\ & \quad \times \frac{Z - A}{(Z_H - A)^2} \exp \left[-\frac{(Z - A)^2}{2(Z_H - A)^2} \right] dZ = 0 \quad (6.27) \\ & \frac{\partial}{\partial \Delta m_{ZII}} \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left\{ -\frac{[Z - (m_{ZI} + \Delta m_{ZI})]^2}{2\sigma^2} \right\} \frac{Z - A}{(Z_H - A)^2} \times \\ & \quad \times \exp \left[-\frac{(Z - A)^2}{2(Z_H - A)^2} \right] dZ = 0, \end{aligned}$$

где $Z_H = \sqrt{2/\pi} (m_{ZII} - \Delta m_{ZII})$ — начальная величина при распределении Релея.

Анализируя представленные выражения, можем записать

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_{ZI} + \Delta Z_{II}}{m_{ZI}} &= \rho_r = \sqrt{S_{u1}/S_{u2}}, \\ \frac{m_{ZII} - \Delta m_{ZII}}{m_{ZI}} &= \rho_0 = \sqrt{S_{u1} S_{u2}}. \end{aligned} \right\} \quad (6.28)$$

Решая данную систему, находим оптимальные допуски на входное сопротивление ИЭ, измеренное в тестовой схеме.

Максимальную вероятность годности в общем случае при $Z_1 \leq Z \leq Z_2$ и $\Delta Z_I = \chi$; $\Delta Z_{II} = \eta$ определяем согласно выражению (6.25) с учетом полученных данных системы уравнений (6.27):

$$\begin{aligned} m_{ZI} + \Delta m_{ZI} &= m_{ZII} - \Delta m_{ZII} = Z_c; \\ P_r(Z) &= \int_{Z_1}^{Z_1 + (\chi + \eta)} \int_{Z_1}^{Z_1 + (\chi + \eta)} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{(Z_I - Z_c)^2}{2\sigma^2} \right] \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{Z_{II} - A}{\sqrt{\frac{2}{\pi} Z_c - A}} \right] \exp \left[-\frac{(Z_{II} - A)^2}{2 \left(\sqrt{\frac{2}{\pi} Z_c - A} \right)^2} \right] dZ_I dZ_{II} + \\
& + \int_{Z_I + (\chi + \eta)}^{Z_2} \int_{Z_I - (\chi + \eta)}^{Z_I + (\chi + \eta)} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp \left[-\frac{(Z_I - Z_c)^2}{2\sigma^2} \right] \frac{Z_{II} - A}{\left(\sqrt{\frac{2}{\pi} Z_c - A} \right)^2} \times \\
& \times \exp \left[-\frac{(Z_{II} - A)^2}{2 \left(\sqrt{\frac{2}{\pi} Z_c - A} \right)^2} \right] dZ_I dZ_{II}. \quad (6.29)
\end{aligned}$$

Построение модели вероятности годности двух согласуемых элементов при широкополосном согласовании подчиняется тем же законам, что и при узкополосном. Но импеданс ИЭ, как и любое комплексное частотно-зависимое сопротивление, может быть согласовано с линией передачи лишь до известной степени.

Введем допущение, что МПЛ и компоненты ИЭ, за исключением выпрямляющего контакта диода, являются частотно-независимыми величинами. Тогда методика расчета вероятности годности должна учитывать предел согласования выпрямляющего контакта. Теоретический предел широкополосного согласования импеданса контакта диодов можно рассчитать по формуле

$$\begin{aligned}
|\Gamma_{\max}| & \geq \exp \left\{ -\frac{\pi}{2} \times \right. \\
& \times \left. \frac{\ln \left[\sqrt{1 + r_s/R_{\text{диф}}} + \sqrt{r_s/R_{\text{диф}}} \right] / \left[\sqrt{1 + r_s/R_{\text{диф}}} - \sqrt{r_s/R_{\text{диф}}} \right]}{\arctg [(x_2 - x_1)/(1 + x_1 x_2)]} \right\}, \quad (6.30)
\end{aligned}$$

где $x_{1,2} = \omega_{1,2} \sqrt{r_s R_{\text{диф}}} C / \sqrt{1 + r_s/R_{\text{диф}}}$.

Если считать разброс входных сопротивлений (в единицах КСВН) совокупности ИЭ на одной частоте равным ρ_r , то данную совокупность нельзя согласовать до КСВН меньшего, чем

$$S_{u \max} = \rho_r \frac{1 + |\Gamma_{\max}|}{1 - |\Gamma_{\max}|}.$$

Поясним определение величины ρ_r . Во-первых, при малой ширине заданной полосы частот разброс параметров можно считать идентичным, с увеличением ширины полосы частот разброс параметров на верхней час-

тоте заметно превышает разброс параметров на нижней частоте рабочего диапазона. Вследствие этого значение должно быть выбрано по статистическим данным измерения импеданса ИЭ на верхней частоте диапазона. Во-вторых, величина ρ_r для произвольной совокупности входных сопротивлений определяется как эффективный радиус окружности, включающей данную совокупность.

Тогда согласно выражению (6.28) для расчета оптимальных допусков при широкополосном согласовании можем записать

$$\frac{m_{Z_I} + \Delta Z_{II}}{m_{Z_I}} = S_{u\max} = \rho_r \frac{1 + |\Gamma_{\max}|}{1 - |\Gamma_{\max}|} = \sqrt{S_{u1} S_{u2}},$$

$$\frac{m_{Z_{II}} - \Delta m_{Z_{II}}}{m_{Z_I}} = \rho_0 = \sqrt{S_{u1} S_{u2}}. \quad (6.31)$$

Для количественной оценки процента выхода годных реализуемых СВЧ-устройств, включающих два последовательных элемента, один из которых представляет комплексную нагрузку, необходимо сравнивать численные величины двух вероятностей годности. Первая представляет вероятность годности, учитывающую реальное распределение по КСВН, вторая — по фазе.

Распределение плотности вероятности фазы ИЭ необходимо нормировать по Z_I , т. е. выполнить условие $m_{\phi_d} = m_{Z_I}$. Количественная оценка производится по вероятности годности, имеющей меньшую величину. Экспериментальные исследования показывают, что при узкополосном согласовании разброс по фазе и КСВН является сравнимой величиной, а при широкополосном согласовании разброс по фазе превышает разброс по КСВН, и распределение плотности вероятности фазы стремится к равновероятному закону.

Для узкополосного согласования сравниваются величины $P_r(Z)$, рассчитанные согласно выражению (6.29) и выражению

$$P_r(Z) = \int_{Z_I}^{Z_I + (Z + \eta)} \int_{Z_I}^{Z_I + (Z + \eta)} \frac{1}{2\pi\sigma_{Z_I}^2} \exp - \frac{(Z_I - m_{Z_I})^2}{2\sigma_{Z_I}^2} \times$$

$$\times \frac{1}{2\pi\sigma_{\phi}^2} \exp - \frac{(Z_{\phi} + m_{Z_{\phi}})^2}{2\sigma_{\phi}^2} dZ_I dZ_{II} +$$

$$+ \int_{Z_1+(\chi+\eta)}^{Z_2} \int_{Z_1-(\chi+\eta)}^{Z_1+(\chi+\eta)} \frac{1}{2\pi\sigma_{Z1}^2} \exp - \frac{(Z_1 - m_{Z1})^2}{2\sigma_{Z1}^2} \frac{1}{2\pi\sigma_{\varphi}^2} \exp - \\ - \frac{(Z_{\varphi} + m_{Z_{\varphi}})^2}{2\sigma_{\varphi}^2} dZ_1 dZ_{\varphi}. \quad (6.32)$$

Меньшая величина $P_r(Z)$ определяет процент выхода годных.

Для широкополосного согласования выход годных оценивается согласно выражению

$$P_r(Z) = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \left[\int_{Z_1}^{Z_1+(\chi+\eta)} \int_{Z_1}^{Z_1+(\chi+\eta)} \frac{1}{2\pi\sigma_{Z1}^2} \exp - \right. \\ \left. - \frac{(Z_1 - m_{Z1})^2}{2\sigma_{Z1}^2} dZ_1 dZ_{\varphi} + \int_{Z_1+(\chi+\eta)}^{Z_2} \int_{Z_1-(\chi+\eta)}^{Z_1+(\chi+\eta)} \frac{1}{2\pi\sigma_{Z1}^2} \exp - \right. \\ \left. - \frac{(Z_1 - m_{Z1})^2}{2\sigma_{Z1}^2} dZ_1 dZ_{11} \right]. \quad (6.33)$$

Таким образом, зная кривые распределения волнового сопротивления МПЛ, параметров импеданса диода и допуски на устройство, можем рассчитать оптимальные допуски на параметры элементов устройства с учетом максимальной вероятности выхода годных устройств и дать количественную оценку процента выхода.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МАРШРУТНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ГИС СВЧ

I. Изготовление плат, содержащих проводники

а. С использованием позитивного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме двухслойной структуры: резистивный (адгезионный) слой — проводящий слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление проводящего и резистивного слоев — получение рисунка проводников; 5) снятие фоторезиста; 6) приварка технологических перемычек; 7) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя — получение проводников; 8) удаление технологических перемычек; 9) резка подложек на платы; 10) контроль геометрических размеров элементов.

б. С использованием негативного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме трехслойной структуры: резистивный (адгезионный) слой — проводящий слой — резистивный (адгезионный) слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление незащищенных участков верхнего адгезионного слоя — получение рисунка проводников; 5) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоев в «окнах» фоторезиста — получение проводников; 6) снятие фоторезиста; 7) селективное травление — удаление участков вне рисунка схемы; 8) резка подложек на платы; 9) контроль геометрических размеров элементов.

II. Изготовление плат способом прямого травления толстых пленок

а. С использованием вакуумного и электрохимического осаждения: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме двухслойной структуры: адгезионный слой — проводящий (толстый) слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление и проводящего слоя и адгезионного — получение рисунка проводников; 5) снятие фоторезиста; 6) приварка технологических перемычек; 7) электрохимическое осаждение защитного покрытия — получение проводников; 8) удаление технологических перемычек; 9) резка подложек на пластины; 10) контроль геометрических размеров элементов.

б. С использованием вакуумного осаждения: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме трехслойной структуры: адгезионный слой — проводящий (толстый) слой — защитный слой; 3) фотолито-

графическая обработка; 4) селективное травление верхнего защитного слоя — получение рисунка в защитной маске; 5) селективное травление проводящего и адгезионного слоя — получение проводников; 6) резка подложек на платы; 7) контроль геометрических размеров элементов.

III. Изготовление плат, содержащих проводники и резисторы

а. С использованием позитивного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме резистивного слоя; 3) фотолитографическая обработка; 4) травление незащищенных участков резистивного слоя — получение резисторов; 5) снятие фоторезиста; 6) нанесение в вакууме двухслойной структуры: резистивный слой — проводящий слой; 7) фотолитографическая обработка; 8) селективное травление — получение рисунка проводящих элементов; 9) снятие фоторезиста; 10) приварка технологических перемычек; 11) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя — получение проводников; 12) удаление технологических перемычек; 13) зачистка резисторов от электрохимически осажденного слоя; 14) резка подложек на платы; 15) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

б. С использованием негативного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме резистивного слоя; 3) фотолитографическая обработка; 4) травление незащищенных участков резистивного слоя — получение резисторов; 5) снятие фоторезиста; 6) нанесение в вакууме трехслойной структуры: резистивный слой — проводящий слой — резистивный (адгезионный) слой; 7) фотолитографическая обработка; 8) селективное травление незащищенных участков верхнего резистивного слоя — получение рисунка проводников; 9) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя в «окнах» фоторезиста — получение проводников; 10) снятие фоторезиста; 11) селективное травление — удаление участков вне рисунка схемы; 12) резка подложки на платы; 13) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

в. С использованием позитивного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме структуры резистивный слой — проводящий слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление незащищенных участков — получение проводников; 5) снятие фоторезиста; 6) фотолитографическая обработка; 7) селективное травление незащищенных участков резистивного слоя — получение резисторов; 8) снятие фоторезиста; 9) приварка технологических перемычек; 10) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя — получение проводников; 11) удаление технологических перемычек; 12) зачистка резисторов от электрохимически осажденного слоя; 13) резка подложек на платы; 14) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

г. С использованием негативного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме структуры резистивный слой — проводящий слой — резистивный (адгезионный) слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление незащищенных участков верхнего резистивного слоя — получение рисунка проводников; 5) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя в «окнах» фоторезиста — получение проводников; 6) снятие фоторезиста; 7) фотолитографическая обработка; 8) селективное травление —

удаление участков проводящего слоя вне рисунка схемы; 9) снятие фоторезиста; 10) фотолитографическая обработка; 11) селективное травление резистивного слоя — получение резисторов; 12) снятие фоторезиста; 13) резка подложек на платы; 14) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

д. С использованием позитивного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме трехслойной структуры: резистивный слой — адгезионный слой — проводящий слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление незащищенных участков — получение рисунка проводников; 5) снятие фоторезиста; 6) фотолитографическая обработка; 7) селективное травление незащищенных участков резистивного слоя — получение резисторов; 8) снятие фоторезиста; 9) приварка технологических перемычек; 10) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя — получение проводников; 11) удаление технологических перемычек; 12) зачистка резисторов от электрохимически осажденного слоя; 13) резка подложек на платы; 14) контроль геометрических размеров элементов и параметров резистора.

е. С использованием негативного фоторезиста: 1) очистка подложек; 2) нанесение в вакууме четырехслойной структуры: резистивный слой — адгезионный подслой — проводящий слой — адгезионный слой; 3) фотолитографическая обработка; 4) селективное травление незащищенных участков верхнего адгезионного слоя — получение рисунка проводников; 5) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя в «окнах» фоторезиста — получение проводников; 6) снятие фоторезиста; 7) фотолитографическая обработка; 8) селективное травление незащищенных участков — открытие резистивного слоя; 9) снятие фоторезиста; 10) фотолитографическая обработка; 11) селективное травление резистивного слоя — получение резисторов; 12) снятие фоторезиста; 13) резка подложки на платы; 14) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

IV. Изготовление плат, содержащих проводники, резисторы и конденсаторы

1) Очистка подложек; 2) нанесение в вакууме резисторов через маски; 3) нанесение в вакууме пленочной структуры конденсатора металл — диэлектрик через маски; 4) нанесение в вакууме структуры резистивный слой — проводящий слой; 5) фотолитографическая обработка; 6) селективное травление незащищенных участков — получение проводниковых элементов; 7) защита конденсаторов и резисторов; 8) электрохимическое осаждение проводящего и защитного слоя на проводники; 9) резка подложки на платы; 10) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов и конденсаторов.

V. Изготовление плат способом трафаретной печати и вжиганием паст

а. Изготовление плат, содержащих проводники: 1) очистка подложек; 2) металлизация торцов и отверстий; 3) трафаретная печать проводников; 4) вжигание проводниковых элементов; 5) резка подложек на платы; 6) контроль геометрических размеров элементов.

б. Изготовление плат, содержащих проводники и резисторы:

1) очистка подложек; 2) металлизация торцов и отверстий; 3) трафаретная печать проводников; 4) вжигание проводниковых элементов; 5) трафаретная печать резисторов; 6) вжигание резисторов; 7) подгонка номинала резисторов; 8) резка подложек на платы; 9) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов.

в. Изготовление плат, содержащих проводники, резисторы и конденсаторы: 1) очистка подложек; 2) металлизация торцов и отверстий; 3) трафаретная печать проводников и нижних обкладок конденсаторов; 4) вжигание проводниковых элементов; 5) трафаретная печать диэлектрических слоев конденсаторов; 6) вжигание диэлектрических слоев; 7) трафаретная печать верхних обкладок конденсаторов; 8) вжигание верхних обкладок конденсаторов; 9) подгонка номинала конденсаторов; 10) трафаретная печать резисторов; 11) вжигание резисторов; 12) подгонка номинала резисторов; 13) резка подложек на платы; 14) контроль геометрических размеров элементов и параметров резисторов и конденсаторов.

VI. Сборка

а. Сборка ГИС СВЧ, микрополосковые платы которой приклеиваются к корпусу: 1) подготовка навесных компонентов и плат; 2) монтаж навесных компонентов, присоединяемых методом пайки, на платы; 3) монтаж навесных компонентов, присоединяемых методом сварки, на платы; 4) установка плат в корпус и приклейка к корпусу; 5) монтаж перемычек, соединяющих платы между собой и с высокочастотными переходниками; 6) контроль и функциональная настройка ГИС (или микросборки) СВЧ;

б. Сборка ГИС СВЧ, микрополосковые платы которой присоединяются к корпусу методом пайки: 1) подготовка навесных компонентов и плат; 2) установка плат в корпус и припайка плат к корпусу; 3) монтаж навесных компонентов, присоединяемых методом пайки, на платы; 4) монтаж навесных компонентов, присоединяемых методом сварки, а также приварка межплатных перемычек и перемычек, соединяющих платы с высокочастотными соединителями; 5) контроль и функциональная настройка ГИС (или микросборки) СВЧ; 6) герметизация.

Характеристика основного оборудования, используемого в производстве ГИС СВЧ

Оборудование для изготовления фотшаблонов. Координатно-граф с программным управлением КПА-1200 предназначен для изготовления оригиналов; обеспечивает точность получения рисунка $\pm 0,05$ мм и минимальную ширину линии 0,1 мм. Наибольший размер оригинала 1200×1200 мм, минимальная скорость вычерчивания: прямых линий 90 мм/с, окружностей и парабол 2 мм/с.

Фотокамера репродукционная ЭМ-513А предназначена для получения уменьшенных фотокопий с оригинала с мультипликацией. Масштабы отъема в зависимости от примененного объектива: 1:10, 1:20, 1:30, 1:40, 1:50. Размеры рабочего поля оригинала 750×750 мм и 1200×1200 мм; время экспозиции при автоматическом срабатывании 0,5—999 с, производительность 1—2 фотшаблона/ч.

Установка размножения фотошаблонов ЭМ-523А предназначена для изготовления рабочих копий; средняя производительность 360 отъемов/ч. Оборудование для получения тонкопленочных микрополосковых плат.

Вакуумное напылительное оборудование. УВН-71П-3 предназначена для полуавтоматического нанесения пленок способом термического испарения из резистивных испарителей; позволяет наносить одно-, двух- и трехслойные структуры на 12 подложек размером 60×48 мм за один рабочий цикл. УВН-74П-3 предназначена для нанесения способом термического испарения двухслойных структур резистивный слой — проводящий слой с двух сторон подложек размером 60×48 мм; производительность — 40 подложек за цикл; имеет один резистивный и два электронно-лучевых испарителя.

УВН-75Р-3 предназначена для нанесения металлических и диэлектрических пленок способом ионно-плазменного и электронно-лучевого испарения на подложки размером 60×48 мм; производительность 115 подложек за цикл, количество электронно-лучевых испарителей — три; ионно-плазменных — один. ИПУ-6-5 предназначена для получения многослойных пленочных структур способом ионно-плазменного распыления; обеспечивает получение резистивных, проводящих и диэлектрических пленок на подложках размером 60×48 мм; производительность 6 подложек за цикл.

Оборудование для фотолитографии. Линия фотолитографии — Титан-ОФ в составе: полуавтомат нанесения фоторезиста ПНФ-6ЦД-130-3 предназначен для нанесения фоторезиста одновременно на четыре подложки способом центрифугирования с автоматическим дозированием в автоматическом цикле; производительность 400 подложек/ч.

Установка сушки и полимеризации фоторезиста УСПФ-1 осуществляет операции сушки и задубливания с помощью инфракрасных лучей; производительность 1000—1200 подложек/ч.

Установка полуавтоматическая совмещения и экспонирования УПСЭ-3 обеспечивает совмещение рисунка на фотошаблоне с сигналовой подложкой с точностью 3 мкм с последующим экспонированием фоторезиста на подложке; производительность 120 подложек/ч.

Установка визуального контроля УВК-2 предназначена для контроля загрязнений (подтеков, царапин, пятен и пр.) на поверхности подложки при косом освещении под микроскопом МБС-2.

Установка обезжиривания ПВХО-ГС-60-2 предназначена для групповой обработки подложек в органическом растворителе. Полуавтомат проявления фоторезиста ППФ-2 обеспечивает обработку подложек в щелочном растворе способом его распыления, их промывку в деионизованной воде и сушку; производительность при проявлении 150 подложек/ч. Полуавтомат снятия фоторезиста ПВХО-ГС-60-1 предназначен для удаления фоторезиста с поверхности подложек групповым способом; производительность 100 подложек/ч.

Оборудование для нанесения гальванических покрытий. Установка УГ-1 предназначена для нанесения гальванических покрытий (меди, серебра, золота) в сочетании с процессами декапирования, промывки и сушки подложек размером 60×48 мм. Стабилизация параметров процесса осаждения достигается за счет автоматического регулирования величины тока, времени процесса и температуры

электролита с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$; осуществляется также перемешивание электролитов, производительность 16—48 шт/ч.

Оборудование для получения толстопленочных микрополосковых плат.

Установка трафаретной печати ГГ-2534 предназначена для нанесения паст на подложки размером 13×17 до 48×60 мм ручным способом, производительность 30 нанесений/ч.

Установка экспонирования ГГ-2258 предназначена для экспонирования светочувствительных материалов при изготовлении сетчатых трафаретов. Установка трафаретной печати ГГ-2323 предназначена для нанесения паст на подложки трех типов размеров 13×17 , $17 \times 20,5$, 17×28 мм в автоматическом режиме, производительность 500 нанесений/ч.

Электропечь конвейерная СК-11/1610-08 предназначена для термической обработки нанесенных элементов; скорость конвейера 6—180 мм/мин; производительность 100 подложек/ч, максимальная рабочая температура 1150°C .

Установка хранения паст АРС2565000 позволяет хранить пасты в бюксах при вращении и заданной температуре.

Установка натяжения и контроля сетки трафарета ГГ37354002 позволяет обеспечить равномерное натяжение сетки с контролем по индикатору часового типа.

Установка экспонирования ГГ-2258 предназначена для экспонирования светочувствительных материалов при изготовлении сетчатых трафаретов; производительность 15—20 отъемов/ч.

Оборудование для резки подложек. Установка Алмаз-3М предназначена для скрайбирования ситалловых подложек толщиной 0,5 мм с последующим механическим разделением на отдельные платы.

Установка УРПА предназначена для сквозного разделения ситалловых подложек толщиной 1 мм, а также ферритовых и поликорковых подложек набором алмазных кругов; скорость резания 20—40 мм/мин; точность размеров 20 мкм.

Оборудование для микросварочных работ. Установка контактной сварки ЭМ-425А предназначена для прецизионной приварки проволочных выводов из золота диаметром 25...60 мкм к пленкам из золота, меди, никеля, алюминия и т. д., производительность 800 присоединений/ч.

Установка ЭМ-431А позволяет осуществлять монтаж приборов с шариковыми выводами к контактными площадкам схем; производительность 400 присоединений/ч; погрешность соединения элементов ± 15 мкм. Установка сварки строчным электродом МС-3Р2-3 предназначена для односторонней контактной сварки проводников из меди и золота сечение до $0,13 \text{ мм}^2$ к проводникам пленочных схем; производительность 1200 сварок/ч.

Оборудование для герметизации корпусов и проверки герметичности.

Установка лазерной сварки Квант-17 предназначена для сварки однородных и разнородных металлов и сплавов с суммарной толщиной свариваемых кромок 0,5—0,7 мм; диаметр сварочной точки 0,6—0,8 мм; скорость движения 100—300 мм/мкм.

Полуавтомат герметизации роликовой сваркой ПГРС-1М предназначен для сварки корпусов за счет тепла, выделяемого в месте контакта при прохождении тока большой плотности; усилие на сварочных роликах 980—7850 Па, производительность до 300 циклов/ч.

Установка контроля герметичности микросхем УКГМ-2. Предназначена для контроля герметичности корпусов масс-спектрометрическим способом; чувствительность установки $1,33 \cdot 10^{-9}$ л·Па/с. Установка контроля герметичности корпусов вакуумно-жидкостным способом УКГМ-3; чувствительность около $1,33 \cdot 10^{-3}$ л·Па/с; размеры рабочей камеры 67×90 мм.

Приборы для контроля геометрических размеров микрополосковых плат.

Универсальный измерительный микроскоп УИМ-23 предназначен для измерений геометрических размеров пленочных элементов; обеспечивает точность 1—2 мкм.

Профилограф — профилометр модель 201 используется для измерения толщины и профиля пленочных элементов в увеличенном масштабе с автоматической записью на электротермическую бумагу; обеспечивает измерение профиля элементов с толщиной в пределах 5—14 классов шероховатости.

Микроинтерферометр Линника МИИ-4 предназначен для контроля толщины пленочных элементов от 0,03 до 2 мкм; обеспечивает точность $\pm 0,027$ мкм.

Микроскоп стереоскопический МБС-9 широко применяется при выполнении производственных операций: ретуши фотошаблонов и микрополосковых плат, пайки, сварки, а также для контроля внешнего вида пленочных элементов; обеспечивает увеличение 3,5—100 крат; рабочее поле 64 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берри Р., Холл П., Гаррис М. Тонкопленочная технология. М., 1972.
2. Бушминский И. П. Изготовление элементов конструкций СВЧ. М., 1974.
3. Бушминский И. П., Морозов Г. В. Конструирование и технология пленочных элементов СВЧ-микросхем. М., 1978.
4. Горелова Г. В., Здор В. В., Свечарник Д. В. Метод оптимума номинала и его применение. М., 1970.
5. Данилин Б. С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. М., 1972.
6. Малорацкий Л. Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. М., 1976.
7. Микроэлектроника: Сб. статей под ред. Ф. В. Луккина и А. А. Васенкова. М., 1968—1976, вып. 1—6.
8. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Ф. Высоцкого. М., 1977.
9. Перец Р. И. Статистические характеристики тракта СВЧ. — Антенны 1973, № 17.
10. Пресс Ф. П. Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. М., 1968.
11. Технология тонких пленок: Справочник. М., 1977.
12. Технология толстых и тонких пленок. — Пер. с англ. под ред. А. Рейсмана и К. Роуза. М., 1972.
13. Топфер М. Микроэлектроника толстых пленок. М., 1973.
14. Федотов Я. А., Поль Г. И. Фотолитография и оптика. М., 1972.
15. Хамер Д., Биггерс Д. Ш. Технология толстопленочных гибридных схем. М., 1975.
16. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем. М., 1977.
17. Радиоэлектроника: Сб. статей. Известия вузов Литовской ССР, 1976—1978.
18. Вопросы радиоэлектроники. Научно-технический сб. сер. ТПО изд. Министерства радиопромышленности, 1970—1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава 1. Гибридные интегральные схемы СВЧ-диапазона	5
§ 1.1. Конструктивно-технологические особенности	5
§ 1.2. Общая характеристика производства	14
§ 1.3. Техничко-экономические характеристики	22
Глава 2. Материалы гибридных интегральных схем СВЧ	31
§ 2.1. Общая характеристика	31
§ 2.2. Подложки	32
§ 2.3. Проводящие пленки	50
§ 2.4. Резистивные пленки	59
§ 2.5. Диэлектрические пленки	68
§ 2.6. Корпуса ГИС СВЧ	72
Глава 3. Процессы производства ГИС СВЧ	75
§ 3.1. Процессы получения пленочных элементов	75
§ 3.2. Сборка ГИС СВЧ	118
§ 3.3. Влияние технологических факторов на свойства пленочных элементов ГИС СВЧ	133
Глава 4. Технологическая оптимизация конструкций ГИС СВЧ	159
§ 4.1. Общая характеристика	159
§ 4.2. Технологическая оптимизация при устойчивом процессе производства	162
§ 4.3. Технологическая оптимизация при неустойчивом процессе производства	172
§ 4.4. Технологическая оптимизация параметров конструкций полосковых узлов	177
Глава 5. Влияние разброса конструкционных параметров на электрические характеристики полосковых линий	188
§ 5.1. Влияние свойств токонесущей поверхности на величину активных потерь	188
§ 5.2. Разброс геометрических размеров	194
§ 5.3. Разброс электрических и магнитных параметров подложек	214
§ 5.4. Совместное влияние конструктивно-технологических погрешностей	237

	Стр.
Глава 6. Анализ и технологическая оптимизация параметров конструкций элементов ГИС СВЧ	244
§ 6.1. Четвертьволновые согласующие переходы на МПЛ	244
§ 6.2. Элементы ГИС СВЧ на связанных линиях	253
§ 6.3. Элементы ГИС СВЧ с полупроводниковыми структурами	265
Приложение. Маршрутные технологические процессы изготовления пленочных ГИС СВЧ	276
Характеристика основного оборудования, используемого в производстве ГИС СВЧ	279
Литература	283

**Игорь Петрович Бушминский
Георгий Валерьевич Морозов**

**ТЕХНОЛОГИЯ ГИБРИДНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СВЧ**

Научный редактор О. Е. Бондаренко. Редактор издательства Е. А. Орехова.
Художественный редактор Т. М. Скворцова. Обложка художника А. С. Александрова. Технический редактор Н. В. Яшукова. Корректор В. В. Кожуткин.

ИБ № 1529

Изд. № ЭР-259. Сдано в набор 28.03.80. Подп. в печать 15.09.80. Т-14842.
Формат 84×108^{1/32}. Бум. тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Объем 15,12 усл. печ. л., 14,67 уч.-изд. л. Тираж 10 000 экз. Зак. № 348.
Цена 60 коп.

Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14

Владимирская типография «Союзполиграфпроект» при Государственном
комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
600000, г. Владимир, Октябрьский проспект, д. 7