# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СВЧ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

## 1. Особенности СВЧ микроэлектронных устройств

В диапазон СВЧ микроэлектроника начала внедряться в последнюю очередь, примерно в середине 60-х годов. В первую очередь это связано с трудностью создания твердотельных СВЧ активных приборов. Кроме того, при проектировании и разработке СВЧ микроэлектронных устройств необходимо учитывать очень многие факторы, обусловленные малыми размерами узлов, концентрацией сильных полей в малых объемах, наличием цепей паразитной связи, взаимодействием близко расположенных элементов, трудностью отвода тепла, требованиями к точности изготовления и однородности материалов.

При проектировании микроэлектронной аппаратуры СВЧ диапазона редко удается разделить электрический расчет схемы, разработку конструкции и даже технологию изготовления. Как правило, это единый процесс.

Для определения параметров микроэлектронного узла СВЧ, строго говоря, необходимо решать граничную задачу электродинамики. Однако даже для регулярных микрополосковых линий, не говоря уже о сложных СВЧ узлах, граничные поверхности имеют сложно форму и волновые уравнения разрешить не удается. Отсюда вытекают требования создания приближенных теорий, различных степеней приближения. Кстати, к настоящему времени строгой теории ни одного микрополоскового устройства нет. Приближенные теории всегда нуждаются в экспериментальной проверке. Поэтому микроэлектронные СВЧ устройства приходится испытывать и настраивать экспериментально.

Несмотря на все эти трудности в развитии микроэлектроники СВЧ диапазона на сегодня имеются заметные успехи. Уже применяются различные твердотельные генераторы и приемники СВЧ. Широкое развитие получили различные микрополосковые устройства: сложные тракты питания, делители мощности, направленные ответвптели и мостовые схемы, частотно-избирательные и невзаимные устройства, фазовращатели, многоканальные коммутаторы и другие узлы радиоаппаратуры СВЧ диапазона. Широко ведутся работы по созданию полностью микроэлектронных РЛС, аппаратуры радиопротиводействия, связных систем и т. д.

Развитию интегральной техники СВЧ диапазона предшествовало освоение полосковых линий передачи, появление тонкопленочной гибридной технологии и разработка твердотельных активных СВЧ приборов, особенно бескорпусных.

Стремление к снижению массы и габаритов аппаратуры привело к развитию техники печатного монтажа. В диапазоне СВЧ появились симметричная и несимметричная полосковые линии с воздушным и диэлектрическим заполнением. Они хорошо переносят ударные нагрузки и вибрацию, просты в изготовлении, их производство можно автоматизировать. Конструкция этих линий позволила применить фотогравирование при изготовлении сложных СВЧ узлов.

На первых этапах развития техники полосковых линий устройства выполнялись на пластинах из фольгированного диэлектрика. Роль механических элементов выполняли сами пластины.

В последующие годы начали широко применять в качестве подложек керамические материалы с высокой диэлектрической проницаемостью. Это привело к значительному уменьшению размеров СВЧ узлов.

Одновременно развивалась полупроводниковая электроника СВЧ. Появились новые активные приборы, работающие в СВЧ диапазоне: диоды Ганна, лавинно-пролетные диоды, СВЧ транзисторы, варакторы, туннельные и переключающие диоды и т. д. Эти приборы позволили решить проблему микроминиатюризации СВЧ аппаратуры на основе техники интегральных схем, улучшить характеристики радиотехнических устройств, повысить их экономичность и надежность.

Использование бескорпусных или малокорпусных активных элементов, встраиваемых непосредственно в пассивную часть схемы, позволило уменьшить паразитные реактивности вводов, улучшить условия согласования активной и пассивной частей схемы.

При достаточно большой функциональной насыщенности каждой схемы существенно сокращается число межсхемных соединений. Отпадает необходимость в большом числе разъемов, что существенно увеличивает надежность устройства. Так, по оценке имеет расчетный срок службы 100 лет. Как показали испытания, при общей наработке в 1 млн. ч в схемах транзисторных усилителей мощности и схемах управления фазой было лишь 3 отказа. Надежность приемопередающего модуля проекта RASSR, представляющего сложное функциональное устройство, характеризуется величиной среднего времени между отказами 30 000 ч.

Важнейшей характеристикой любой аппаратуры является се стоимость. Анализ методов проектирования, изготовления и испытания радиоэлектронной аппаратуры на СВЧ ГИС показывает большие потенциальные возможности снижения ее стоимости при серийном изготовлении.

В стоимость СВЧ аппаратуры входит стоимость активных элементов, интегральных схем, сборки и, если необходимо, корпусирования и испытаний.

Стоимость активных приборов СВЧ непрерывно уменьшается по мере улучшения технологии их производства и объема выпуска.

Стоимость пассивной микросхемы слабо зависит от ее сложности и приблизительно пропорциональна площади занимаемой подложки. Чтобы уменьшить стоимость микросхемы, необходимо ее упрощать и, как следствие, уменьшать число этапов обработки и циклов откачки; уменьшать размеры схемы, используя подложки с большой диэлектрической проницаемостью и улучшая ее топологию; использовать, где это возможно, безвакуумную технологию толстых пленок; применять технологические процессы, для которых существует оборудование массового производства.

Стоимость сборки микросхемы существенно зависит от степени ее автоматизации. Возможности автоматизации, в свою очередь, зависят от конструкции навесных элементов.

В стоимость корпусирования входит стоимость корпуса, герметичных разъемов и процесса герметизации. На стоимость корпусирования существенно влияет функциональная насыщенность устройства, заключенного в корпус.

Относительно большой вклад в стоимость микроэлектронного СВЧ устройства вносят операции его проверки. Отсюда вытекает важность создания высокопроизводительной автоматизированной измерительной аппаратуры.

Как известно, главным методом снижения стоимости аппаратуры является максимальная автоматизация всех технологических процессов изготовления и проверки. Это возможно только при большой программе выпуска. Из опыта известно, что в микроэлектронной технике увеличение выпуска на 3 порядка снижает стоимость одного изделия на порядок.

На существующем этапе развития микроэлектронной техники СВЧ аппаратуре на интегральных схемах присущи и свои недостатки.

Первый из них заключается в энергетических ограничениях. Твердотельные генераторы и усилители СВЧ пока еще имеют относительно невысокий к. п. д., что приводит к выделению значительной мощности внутри твердого тела и, следовательно, к его перегреву. Как известно, даже для кремниевых приборов температура не должна превышать 150 ... 170°С, в то время как у электродов вакуумных приборов она может достигать нескольких сотен градусов.

Потери в микрополосковой линии существенно больше, чем у других типов линий. На них трудно осуществлять высокодобротные системы.

Однако эти недостатки не являются принципиальными. По мере разработки новых активных элементов, повышения к. п. д. генераторов и усилителей, развития техники охлаждающих устройств, улучшения характеристик материалов, применяемых в микроэлектронике, она все больше будет продвигаться в области более высоких частот и больших мощностей.

## 2. Технологические и конструктивные основы СВЧ интегральных микросхем

Интегральные микросхемы СВЧ диапазона могут быть выполнены как в монолитном, так и гибридно-пленочном исполнении.

В качестве материалов подложек применяют высокоомный кремний, полуизолирующий арсенид галлия, керамику с высоким значением диэлектрической проницаемости, а также кварц, ферриты и комбинации перечисленных материалов для составных конструкций.

В настоящее время в СВЧ диапазоне наибольшее практическое применение получили гибридно-пленочные ИС. Отличительной особенностью микросхем данного класса является то, что подложка вместе с металлизацией лицевой (проводник) и обратной сторон образует микрополосковую линию передачи (рис. 2.1).

По конструктивно-технологическим признакам, а также с учетом элементной базы гибридно-пленочные микросхемы СВЧ можно разделить на две основные группы: микрополосковые схемы с распределенными параметрами; пассивные RCL-микросхемы, содержащие сосредоточенные элементы

### Микрополосковые схемы с распределенными параметрами.

Первая группа пленочных СВЧ микросхем содержит пассивные элементы (резонансные контуры, подстроечные элементы и др.), выполненные в виде отрезков линий передачи определенной конфигурации. Структура микрополосковой линии передачи зависит от технологии изготовления (рис. 2 2). Иногда проводящий слой микрополосковой линии выполняют без защитного покрытия, если основу проводника составляют пленки благородных металлов, например золота, и без адгезийного подслоя, например, если рабочим слоем служит алюминий.



Рис 1.2 Микрополосковая линия передачи.

1 ⎯ подложка толщиной h, 2 ⎯ проводник полосковой линии шириной *w*, 3 ⎯ проводящий слой на обратной стороне подложки.

СВЧ микросхемы с распределенными параметрами изготавливают тремя основными способами:

* нанесение и вжигание паст по толстопленочной технологии;
* гальваническое наращивание толстых пленок в сочетании с фотолитографией и напылением;
* термическое испарение в вакууме в сочетании с фотолитографией.

Толстопленочная технология характеризуется простотой и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Эта технология широко используется в зарубежной практике, однако диапазон ее применения ограничен из-за принципиальных недостатков. К наиболее существенным из этих недостатков следует отнести: большое значение удельного сопротивления проводящих элементов, обусловливающее увеличение потерь в 1,5—2 раза по сравнению с потерями в проводниках из чистой вакуумно-плавленой меди; необходимость применять подложки с шероховатой развитой поверхностью для обеспечения адгезии проводника к подложке, что также приводит к увеличению потерь (образование вихревых токов на неровностях проводника). Кроме того, метод трафаретной печати, используемый при такой технологии, имеет малые разрешающую способность и точность воспроизведения геометрических размеров элементов как по ширине, так и по толщине. Так, невоспроизводимость по толщине слоя может достигать ±10 мкм, а по ширине ±30 мкм, причем невоспроизводимость геометрических размеров в значительной степени зависит от ширины элементов.

Если на одной подложке необходимо выполнить элементы с различными геометрическими размерами, их разброс возрастает. Наряду с указанными недостатками следует отметить значительную неоднородность и зернистость структуры толстых пленок, что служит дополнительным источником потерь в СВЧ диапазоне. Однако микросхемы, к электрическим параметрам которых не предъявляется высоких требований, из экономических соображений целесообразно изготавливать по толстопленочной технологии.

Для создания микросхем со сложной конфигурацией элементов (типа меандра, спирали) и воспроизводимостью геометрических размеров не хуже ±15 мкм применяют тонкопленочную технологию, основанную на получении проводящих пленок гальваническим осаждением или термическим испарением в вакууме и формировании определенной конфигурации элементов методом фотолитографии. Различают две разновидности маршрутов изготовления микрополосковых схем с применением гальванического осаждения толстых пленок меди: а) наращивание меди по сформированному рисунку микросхемы с защитой технологических коммутационных проводников и б) осаждение меди в окна фоторезиста, который является контактной маской, сформированной на сплошном подслое меди (рис. 2.2).

По первому маршруту термическим испарением в вакуумы на керамическую подложку наносят пленку меди с адгезионным подслоем общей толщиной порядка 1 мкм. Затем выполняют фотолитографию и травление по напыленным слоям, причем рисунок защитного рельефа включает не только рабочие элементы микросхемы, но и коммутационные технологические проводники. Последние обеспечивают электрическую связь всех элементов, необходимую для подачи потенциала на все проводники при их гальваническом усилении, в то время как контакт с внешней цепью имеет один из элементов. После этого снова осуществляют фотолитографию для защиты коммутационных проводников. После усиления рабочих элементов и нанесения на них антикоррозийного покрытия гальваническим осаждением удаляют фоторезист и травят технологические проводники. Недостатком данного маршрута изготовления является наличие технологических коммутационных проводников, что приводит к увеличению числа рабочих фотошаблонов, фотолитографических операций и, следовательно, к усложнению технологического процесса изготовления микросхем.

Второй маршрут изготовления микрополосковых схем с применением гальванического усиления основан на другом принципе подачи потенциала на все рабочие элементы микросхемы. В этом случае, так же как по первому маршруту, сначала термическим испарением в вакууме на керамическую подложку наносят сплошной слой меди с адгезионным подслоем общей толщиной не более 1 мкм (желательно 0,4—0,7 мкм). Затем формируют защитный рельеф и создают фоторезистивную контактную маску. Чтобы исключить боковое разрастание проводников, целесообразно использовать слои фоторезиста значительной толщины, близкой к толщине проводящего слоя при гальваническом наращивании. Таким образом, контактирование в этом случае осуществляют по сплошному напыленному слою меди, а гальванические слои осаждают в окна на фоторезисте по пробельным участкам. После гальванического усиления рабочих участков и нанесения на них антикоррозийного покрытия удаляют фоторезистивную контактную маску, растворяя ее, и стравливают тонкий слой меди с адгезионным подслоем. Иногда поверхности дополнительно очищают плазмохимическим способом. Для формирования контактной маски толщиной более 2 мкм используют сканирование электронным лучом. В этом случае материал контактной маски выбирают чувствительным к воздействию бомбардировки электронами (электронорезист).

Таким образом, второй технологический маршрут свободен от недостатков первого, однако имеет свои трудности. Среди трудностей данного маршрута следует отметить: сложность нанесения и удаления толстой фоторезистивной пленки, загрязнение электролита при гальваническом наращивании проводящего слоя в окна фоторезистивной маски, наличие значительного разрастания элементов в случае тонкого слоя фоторезиста, искажение профиля проводников при травлении слоя меди с адгезионным подслоем.



Общими недостатками указанных маршрутов изготовления микрополосковых схем являются: зависимость удельного сопротивления проводников от технологических режимов осаждения, состава и чистоты электролитов; наличие неравномерного роста толщины пленок на подложках больших размеров и в схемах, имеющих элементы с различной шириной проводящих полосок. Неравномерность по толщине может достигать ±7 мкм при средней толщине проводящего слоя ~20 мкм, невоспроизводимость геометрических размеров элементов по ширине при этом составляет 15... ... 20 мкм.

Чтобы исключить искажения профиля проводящих элементов и зависимость неравномерности геометрических размеров элементов по толщине и ширине от их геометрической формы, применяют метод прямого травления толстых пленок (рис. 2.3). Толстые пленки могут быть получены различными способами, в том числе гальваническим усилением тонких напыленных слоев, а также термическим испарением в вакууме. Изготовлять микросхемы на основе данного метода можно также по двум различным маршрутам, отличающимся последовательностью технологических операций нанесения защитного антикоррозийного покрытия. Антикоррозийное покрытие может быть нанесено термическим испарением в вакууме и может служить затем маской при селективном травлении рабочих проводников или гальваническим и химическим осаждением как после формирования рисунка элементов микросхемы, так и до выполнения фотолитографии. Маршруты изготовления просты и не требуют дополнительного описания технологических операций. Остановимся на рассмотрении характерных достоинств и недостатков последнего маршрута, что важно знать при выборе конструкции и оптимального технологического варианта ее реализации.

При травлении толстых пленок, полученных гальваническим осаждением, требуется усиление фоторезистивной маски, чтобы исключить проколы из-за развитой поверхности осадков. Кроме того, травление пленок может быть неравномерным из-за пористой и крупнозернистой структуры осадков Поэтому схемы, к выходным параметрам которых предъявляются повышенные требования, целесообразно изготавливать по данному маршруту, используя толстые пленки, полученные термическим испарением в вакууме. В этом случае пленки отличаются высокой плотностью и однородностью, их сдельное сопротивление с точностью до погрешности измерения равно сдельному сопротивлению массивного образца меди. Поэтому потери в СВЧ диапазоне будут минимальными, а травление слоев равномерным. К общим недостаткам последних маршрутов изготовления СВЧ микросхем с распределенными параметрами можно отнести следующее:

* необходимость повышать скорость удаления продуктов реакции, уменьшать клин подтравливания и увеличивать вязкость травителя для исключения проникновения последнею в поры фоторезиста и на границе раздела фоторезистивная пленка — приводящая пленка,
* ограничение, накладываемое на минимальный размер зазора между проводниками, связанное с наличием клина подтравливания и необходимостью изготовления фотошаблонов с его учетом;
* при нанесении защитного антикоррозийного покрытия до проведения процессов фотолитографии торцы проводящих элементов оказываются незащищенными, что может привести к изменению параметров микросхемы при длительной работе без герметизации, когда основной рабочий слой подвержен интенсивной коррозии; нанесение же защитного покрытия после формирования рисунка элементов микросхемы химическими методами требует дополнительной активации поверхности, а гальваническим осаждением специального контактирования между элементами.

Таким образом, рассмотренные технологические методы формирования микрополосковых схем позволяют создавать проводящие элементы, обеспечивающие различные выходные параметры микросхем. Для получения микросхем с малым зазором между проводниками целесообразно использовать первые два маршрута с учетом их особенностей. При формировании схем с высокой добротностью и воспроизводимостью геометрических размеров при зазоре между элементами не менее 40 мкм рекомендуется метод полного травления толстых пленок, полученных термическим испарением в вакууме, который не имеет аналогов и в этом случае является наиболее оптимальным. Плотные осадки можно также получить и гальваническим осаждением, если создать особенно чистые условия получения пленок, применяя реверсирование, импульсные или переменные токи в процессе осаждения, а также резко увеличивая скорость осаждения слоев.

### Микрополосковые схемы, содержащие сосредоточенные элементы.

Микросхемы СВЧ диапазона, содержащие сосредоточенные элементы, по своей структуре и конструкции напоминают низкочастотные микросхемы общего назначения. Они отличаются от последних повышенной толщиной рабочих слоев и малыми номинальными значениями элементов. Расчет пассивных сосредоточенных элементов аналогичен расчету пленочных *R-* и *С*- элементов с учетом повышенной мощности и добротности. Микросхемы с такими элементами предназначены для работы в более низкочастотной области СВЧ диапазона

Изготавливают указанные микросхемы по танталовой технологии, усиливая проводники гальваническим наращиванием или термическим испарением в вакууме в сочетании с фотолитографией и химическим никелированием, и золочением (рис. 2 4). В первом случае всю поверхность подложки покрывают тонким слоем пятиокиси тантала. При этом образуется очень твердая и гладкая пленка, устойчивая к воздействию реактивных сред используемых в технологическом процессе при последующем формировании рабочих элементов (резисторов, полосковых линий, конденсаторов и др. ). Затем на всю поверхность подложки наносят слой нитрида тантала*,* служащий основой для создания резистивных элементов, а также для формирования диэлектрика конденсаторной структуры.

Конфигурация резистивных и емкостных элементов задается методом фотолитографии. Величину сопротивления резисторов можно доводить до заданного номинала с высокой точностью, изменяя толщину слоя нитрида тантала в результате формирования на его поверхности пятиокиси тантала способом электрохимического анодирования.



Пленочные проводники получают термическим испарением в вакууме тонкого слоя золота с адгезионным подслоем хрома при последующем наращивании гальванической меди, защищаемой золотым покрытием. Общая толщина проводника такой многослойной структуры составляет не менее 10 мкм.

Для создания надежной конденсаторной структуры с малым значением удельной емкости применяют двухслойный диэлектрик. Первый слой пятиокиси тантала формируют анодированием пленки тантала или нитрида тантала. Толщина полученной пленки Та2О5 относительно мала, а удельная емкость ее слишком велика для создания конденсаторов с малыми номинальными значениями. Нанося на основной слой пятиокиси тантала с большим значением диэлектрической постоянной ( ε ~ 22) пленку окиси кремния с малым значением диэлектрической постоянной (ε ≤ 6), легко получить малые удельные емкости в двухслойной структуре. Наличие двух слоев различных диэлектриков в конденсаторной структуре повышает надежность пленочных емкостных элементов. Верхний электрод — золото с подслоем хрома *4 —* получен термическим испарением в вакууме. Нижним электродом является слой нитрида тантала *3,* сопротивление которого достаточно велико.

Рассмотренный вариант комплексной технологии изготовления пассивной части ГИС СВЧ диапазона очень сложен и трудоемок, а совместимость различных технологических методик приводит к серьезным ограничениям рабочих характеристик микросхемы в целом. Все это сдерживает внедрение ГИС СВЧ диапазона, содержащих сосредоточенные *R*- и *С*- элементы в массовое производство.

В настоящее время наиболее широкое распространение в производстве ГИС общего применения получил вакуумный метод нанесения тонких пленок с использованием избирательного химического травления как наиболее простой, менее трудоемкий и пригодный для массового производства. Достигнутые успехи в области создания пассивных *R*-,*C*- и *L*-элементов, а также в получении бездефектных пленок меди толщиной более 5 мкм термическим испарением в вакууме способствовали созданию комплексной технологии изготовления ГИС СВЧ диапазона (см. рис. 2.4). Применение вакумно-термических методов для получения СВЧ микросхем позволяет по производственным признакам поставить их в общий ряд гибридных интегральных микросхем. В качестве резистивных элементов в этом случае используют пленки хрома, нихрома и металлосилицидных сплавов, диэлектриком конденсаторной структуры служит боросиликатное стекло. Проводники создают также термическим испарением в вакууме толстых пленок меди с адгезионным подслоем при последующей защите их химическим или гальваническим способом.

### Конструктивные основы пленочных СВЧ микросхем.

Микрополосковые схемы СВЧ диапазона, построенные на элементах с распределенными параметрами, представляют наиболее обширный класс микросхем, предназначенных для работы в коротковолновой части СВЧ диапазона (3 ... 30 ГГц). Пассивные СВЧ элементы с распределенными параметрами выполняют в виде разветвленных отрезков микрополосковой линии заданной конфигурации, которая образуется между нижней металлизированной поверхностью и проводником, нанесенным на верхнюю поверхность платы. Поэтому конструкция прибора и его рабочие характеристики в значительной степени зависят от основных параметров исходного материала подложки и технологического маршрута изготовления микросхемы. При этом важно, чтобы потери в микрополосковой линии передачи на фиксированной частоте были минимальны, а конструкция обеспечивала надежность микросборки после монтажа навесных элементов и сборки узла или ячейки в целом.

Потери в микрополосковой линии передачи зависят от удельного сопротивления металлической пленки — проводника, его конструкции и характеристического сопротивления микрополосковой линии, величина которого является функцией толщины и диэлектрической постоянной подложки. Для уменьшения потерь в микрополосковой линии удельное сопротивление металлического покрытия должно быть минимально возможным. Уменьшают удельное сопротивление проводящего покрытия, выбирая исходный материал с высокой проводимостью и обеспечивая высокую идентичность свойств пленочного и массивного образцов.

С другой стороны, уменьшить потери можно и конструктивным решением функционального узла. Известно, что потери уменьшаются при увеличении ширины микрополосковой линии. Это можно учесть при конструировании микрополосковых схем и снизить потери, увеличивая толщину подложки, чтобы обеспечить постоянство характеристического сопротивления. Кроме того, конструкцию элементов можно изменить, если выбрать материал подложки со свойствами, оптимальными для данной группы микросхем. С этой точки зрения при конструировании СВЧ микросхем к подложкам предъявляются дополнительные требования, связанные со спецификой работы СВЧ устройств. Наряду с общими требованиями к классу чистоты обработки поверхности и механическим свойствам подложек, обеспечивающим возможность их химической и механической обработки, а также работу устройства в заданном интервале температур, должны выполняться следующие требования:

* диэлектрическая проницаемость исходного материала должны быть ε > 8 для уменьшения геометрических размеров элементов линий передач, работающих в нижней части диапазона СВЧ;
* диэлектрические потери в подложке должны быть минимальными и иметь высокую воспроизводимость не только от партии *к* партии, но и в каждой точке подложки для уменьшения потерь в линии передачи;
* подложки должны обладать высокой теплопроводностью, а коэффициенты линейного расширения материалов подложек, корпусов и вспомогательных материалов должны быть согласованы для обеспечения работы микросхем при повышенных уровнях мощности.

Конструирование СВЧ микросхем включает расчет и проектирование изделия по заданным электрическим параметрам с учетом процессов сборки и регулировки. При этом определяют вариант схемы узла, материал и геометрические размеры подложки, исходные материалы и последовательность их нанесения для получения проводящих, резистивных и емкостных элементов, а также их геометрические размеры и взаимное расположение.

Исходными данными для расчета геометрических размеров полосковой линии передачи являются характеристическое сопротивление и добротность, которые зависят от параметров материала обложки и металлического покрытия.

Исходя из требований к добротности, рассчитывают геометрические размеры микрополосковой линии передач и выбирают исходные материалы и технологический маршрут изготовления микросхемы. Погрешность параметров микрополосковой линии передачи определяют с учетом как погрешности исходных формул для расчета, так и технологических допусков и невоспроизводимость толщины и диэлектрической проницаемости подложки. Поскольку толщину микрополосковой линии передачи выбирают не менее 1 скинслоев, невоспроизводимостью по толщине проводника, как правило, пренебрегают.

Исходными данными для расчета геометрических размеров резистивных элементов являются номинальное значение их сопротивления *R* и рабочая мощность рассеяния *Р.* Резистивный материал выбирают с учетом удельного сопротивления единицы поверхности пленки ро, ее толщины *1,* допустимой удельной мощности рассеяния Ро. Необходимое удельное сопротивление должно обеспечиваться при толщине пленки не менее 0,05 мкм, в противном случае надежность резисторов при повышенных электрических и тепловых нагрузках не гарантируется. Следует учитывать также, что допустимая удельная мощность рассеяния для конкретного резистивного материала определенной толщины зависит от теплопроводности материала подложки и класса чистоты обработки се поверхности. Поэтому при конструировании микросхем, работающих при повышенной мощности рассеяния, допустимую мощность целесообразно рассчитывать по температуре локального перегрева в зоне резистора, которая не должна превышать 100 С.

Перекрытие резистивной пленки и проводящего элемента в зоне их контактирования (рис. 2.5) должно обеспечивать надежный контакт независимо от способов формирования элементов и придания им заданной конфигурации.

Геометрические размеры резистивных элементов СВЧ микросхем рассчитывают по формулам, применяемым для расчета низкочастотных резисторов:

где *S, 1, b—*площадь, длина и ширина резистора; *N—*число квадратов; *Р0* и *R —* удельные мощность рассеяния и сопротивление.

При вычерчивании топологии резистивного слоя к расчетной длине резистивной полоски прибавляют не менее 100... 200 мкм с каждой стороны на перекрытие с проводником.

Конденсаторы СВЧ микросхем могут быть выполнены как в виде трехслойной пленочной структуры, содержащей обкладки и диэлектрический слой, так и в виде планарной конструкции, формируемой в едином технологическом цикле с другими проводящими элементами (микрополосковая линия передачи, индуктивная катушка и др.). Планарные конденсаторы имеют малые значения емкости (не более 2 пФ), а пленочные— емкости больших номиналов. Погонная емкость планарных конденсаторов зависит от ширины зазора, толщины пленок и диэлектрической постоянной материала подложки или наполнителя. Если использовать наполнители с большим значением диэлектрической постоянной, то можно увеличить ее погонную емкость между электродами на порядок.



Пленочные конденсаторы рассчитывают исходя из требуемого номинального значения емкости с учетом удельной емкости структуры. Площадь перекрытия обкладок определяют по формуле *Sc =* С/Со, где С — номинальное значение емкости, а Со — удельное. Затем вносят технологическую поправку на под-пыл и выводы для контактирования. Для повышения надежности конденсаторов длина линии пересечения нижней и верхней обкладок, разделенных диэлектрическим слоем, должна быть минимальной. С другой стороны, для снижения потерь за счет сопротивления обкладок рекомендуется прямоугольная форма конденсатора с выводом по широкой стороне. Конструкцию конденсатора выбирают на основе компромиссного решения с учетом его рабочих характеристик в составе микросхемы.

Индуктивные элементы также выполняют в едином технологическом цикле (в одном слое) с остальными элементами микросхемы. Существующая технология позволяет реализовать индуктивные элементы высокой добротности (Q > 100) в виде спирали с номинальными значениями *L = 1 ... 100 нГ*.

Индуктивные элементы малых номинальных значений иногда выполняют в виде отрезков полосковых линий или в виде меандра. В этом случае при расчете индуктивности учитывают не только длину и ширину линии, но и ее толщину, а также влияние металлического основания (металлизации обратной стороны).

При составлении и расчете топологического чертежа микросхемы необходимо учитывать конструкцию и геометрические размеры навесных элементов, а также способ их присоединения к пленочным элементам. Кратко остановимся на особенностях СВЧ микросхем. В ГИС СВЧ диапазона применяют полупроводниковые приборы различной конструкции. Оптимальной с точки зрения возможности автоматизации процессов сборки является конструкция полупроводниковых приборов типа LID с балочными выводами и с керамическими полукорпусами (безвыводной перевернутый прибор). Навесные пассивные элементы (резисторы и конденсаторы) выполняют в виде таблеток с балочными выводами.

После монтажа навесных элементов и настройки микросборок их стыкуют в корпусе. В этом случае должны быть выполнены два наиболее важных условия:

* микросхемы должны стыковаться геометрически одна с другой по входным и выходным контактам с достаточно высокой точностью;
* переход от одной микросхемы к другой должен обеспечивать надежный электрический контакт не только по проводникам микрополосковых линий, но и по металлизации основания (обратных сторон микросхем).

Требования к точности совмещения «вход—выход» повышаются с ростом рабочей частоты. При смещении стыкуемых микрополосковых линий или возникновении между ними зазора в СВЧ тракте устройства проявляют реактивность, которые приводят к рассогласованию.

Надежный электрический контакт обеспечивают, выбирая методы и материалы крепления подложек микросхем к корпусу. В случае пайки мягким низкотемпературным припоем важна совместимость материалов подложек и корпуса по температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР). При нагреве или охлаждении системы из-за жесткости конструкции могут возникнут внутренние напряжения в подложке и, как результат ее механическое разрушение или отслоение проводящего покрытия. eсли для крепления подложек использовать токопроводящие эластичные клеи, то проблема механической надежности исключается, однако переходное сопротивление систем металлизация—корпуса и подложка — подложка увеличивается. Кроме того, сопротивление эластичных проводящих клеев характеризуется существенной температурной зависимостью.

Интересным вариантом является механическое крепление подложек к корпусу с помощью столбиков или уголковых прижимов. Достоинство механического способа заключается в простоте монтажа и демонтажа микросхем, что позволяет быстро производить ремонт аппаратуры. Испытания систем, содержащих большое число микросхем, закрепленных механически, показали их высокую надежность. К недостаткам данного варианта следует отнести незначительное увеличение площади за счет крепления на корпусе угловых или боковых прижимов и необходимость сверления отверстий при использовании столбиков.

Чтобы повысить компактность конструкции устройства, иногда применяют так называемое двухэтажное размещение. При этом микрополосковые линии соединяют центральными проводниками коротких отрезков коаксиальных трактов. Правильный выбор значения волнового сопротивления коаксиальных переходов обеспечивает согласование микросхем в широкой полосе частот.

Герметичность соединения крышки с корпусом создают пайкой или сваркой. Разъем герметизируют с помощью металлостеклянного спая, используя согласующуюся по ТКЛР пару ковар—кварцевое стекло.

Все ее параметры определяют по приближенным формулам. Так, для определения волнового сопротивления линии одной из наиболее употребительных является формула

 (1)

где ω*, —* эффективная ширина полоски. Она зависит от толщины полоски

 (2)

Формула (1) дает достаточно хорошее приближение, и оно тем точнее, чем меньше отношение ω*/h.* Так, при ωэ*/h>0,4* ошибка составляет порядка 3%, а при ωэ*/h<=0,4 —* не превышает 1%.

Фазовые характеристики поля в линии определяются относительной эффективной диэлектрической проницаемостью ωэ, которая учитывает степень концентрации поля в диэлектрике подложки

 (3)

## 3. Пассивные СВЧ устройства.

Пассивные СВЧ устройства являются узлами, выполненными из отрезков линий передач. К ним относятся регулярные линии передачи, согласующие цепи, делители и сумматоры мощности, частотно-избирательные и невзаимные устройства, переключатели, устройства управляющие амплитудой и фазой проходящих сигналов. Другими словами, это устройства, в которых нет источников СВЧ колебаний.

В ГИС СВЧ диапазона применяют несимметричные полосковые линии, щелевые линии и компланарные волноводы. Основой микрополосковой линии передачи является несимметричная полосковая линия.

В несимметричной микрополосковой линии существуют 6 составляющих полей *Е* и *Н*, т.е. кроме волны типа *Т* там присутствуют волны высших типов. Наличие этих волн приводит к зависимости фазовой скорости от частоты, т. е. линия обладает дисперсией. В настоящее время строгой теории несимметричной полосковой линии нет, поэтому:

Очевидно, что чем больше диэлектрическая проницаемость материала подложки ε и ее толщина *h,* тем ближе ε*э* к ε. Так, например, для подложки из окиси алюминия (ε = 10) εэ=6,8, высокоомного кремния (ε = 12) εэ = 7 *(W0/h =* 1). Длина волны в линии и фазовая скорость без учета дисперсии составляют:



Выражения (1)—(3) получены в предположении, что в линии распространяется только волна типа *Т.* С ростом частоты (увеличением всех размеров линии в долях длины волны) увеличивается относительное содержание волн высших типов. Линия становится системой дисперсионной. Частотные зависимости учитывают поправкой к эффективной диэлектрической проницаемости ε`э  *=* εэ + ε.

Частота, выше которой уже необходимо учитывать зависимость εэ, от частоты, определяется формулой

 (4)

Как следует из формулы (4), для уменьшения дисперсионных свойств линии необходимо уменьшать *h* и ε, т. е. уменьшать размеры линии в длинах волн.

Активные потери в несимметричной полосковой линии складываются из потерь в металле полоски и основания линии αм, потерь в диэлектрике подложки αε, и потерь на излучение αи: α∑ *=* αм + αε + αи

Выражения для коэффициентов затухания αм [дБ/м] и αε [дБ/м] имеют следующий вид: (5)

 (6)

Здесь *f —* частота, Гц; α — проводимость материала основания и полоски, 1/Ом•м; tgδ—тангенс угла диэлектрических потерь. На частоте *f* == 10 ГГц, например, коэффициент затухания линии с волновым сопротивлением Z0 = 50 0м, материалом проводников— медью на диэлектрической подложке с ε= 10 имеет следующий порядок: αм = 0,5; 0,95; 2 дБ/м при h=1; 0,5; 0,25 м соответственно. Как видно из приведенного примера, потери в линии увеличиваются с уменьшением толщины подложки h*.*

Материалы, применяемые для подложек, имеют весьма малый tgδ ≈ (1...2)⋅10-4, поэтому коэффициенты затухания в диэлектрике до частот *f* = 10 ГГц αε *<* 0,1 дБ/м, т. е. потери в диэлектрике значительно меньше потерь в проводниках линии.

Коэффициент затухания, обусловленный излучением, в правильно изготовленной регулярной линии мал, и им обычно пренебрегают. На высоких частотах *(f >* 10 ГГц) при наличии нерегулярностей возрастает уровень волн высших типов и потери на излучение становятся заметными.

Максимальная передаваемая по несимметричной полосковой линии средняя мощность ограничивается допустимым нагревом подложки и проводников. Ориентировочные значения предельных мощностей линии с поликоровой и сапфировой подложками составляют 80...100 Вт.

Предельная импульсная мощность определяется допустимым значением напряженности электрического поля в подложке. Эта мощность составляет несколько киловатт при скважности сигнала более 50.

Для уменьшения паразитных связей с соседними цепями, герметизации микросборок и механической защиты линии применяют экранированные микрополосковые линии (рис. 2.7). Близость крышки экрана к полоске изменяет параметры линии. Волновое сопротивление линии и эффективная диэлектрическая проницаемость при этом уменьшаются. Например, при ε *=* 7,5; *w/h =* 1 установка экрана на высоте *b/h* = 2 уменьшает волновое сопротивление Zo *=* 65 0м до 55 0м и εэ = 4,8 до 4. При расстоянии до экрана *b/h >* 5 параметры линии изменяются мало, поэтому располагать экран ближе к линии не следует.



В последние годы разработаны еще два типа линии передачи для пленочных микросхем: щелевая линия и компланарный волновод. У этих типов линий все проводники расположены на одной поверхности подложки. Щелевая линия образуется одной узкой щелью в проводящем слое, нанесенном на одну сторону подложки. В компланарном волноводе две щели. Конструкция этих линий оказывается удобной при параллельном включении в них различных сосредоточенных элементов, в том числе и активных полупроводниковых приборов.

Структура поля в щелевой линии и компланарном волноводе существенно отличается от структуры поля волны типа *Т.* Поле щелевой линии, например (рис. 2.8), имеет продольную составляющую магнитного поля Н, т. е. это фактически волна типа *H,* хотя ее критическая частота равна нулю. В этих линиях могут распространяться колебания любой частоты, вплоть до *f = 0.*

Надо отметить, что в названии щелевой линии имеется терминологическая неточность. В электродинамике и технике СВЧ волноводом принято называть тракт, структура поля которого имеет продольные составляющие полей *Е* или *Н* (металлический, диэлектрический, лучевой волноводы). С этой точки зрения щелевая линия является волноводом.

Подложки рассматриваемых линий выполняют из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Это обеспечивает концентрацию поля вблизи щели. Фазовая скорость, длина волны и волновое сопротивление таких линий зависят от частоты, т. е. эти системы дисперсионные.







Отметим еще одно свойство этих типов линии. Магнитное поле имеет две ортогональные составляющие, сдвинутые по фазе. Следовательно, в линиях есть области эллиптической поляризации магнитного поля. Если в этих областях разместить намагниченный поперечным магнитным полем феррит, то, используя эффект Коттона—Мутона и поперечный ферромагнитный резонанс феррита, можно создать невзаимные приборы: вентили, циркуляторы, фазовращатели с дифференциальным фазовым сдвигом.

Остановимся более подробно на щелевой линии. В нулевом приближении все фазовые характеристики поля определяются с помощью эффективной диэлектрической проницаемости, которая зависит от ε материала подложки:

 7

Последующие приближения, требующие решения граничной задачи, показывают зависимость εэ от частоты и геометрии линии (рис. 2 10). Здесь же приведена кривая для несимметричной микрополосковой линии (штриховая кривая).

Следует оговорить понятие волнового сопротивления щелевой линии. Поскольку поле в щелевой линии не потенциальное, волновое сопротивление здесь вводится как волновое сопротивление линии, эквивалентной волноводу. Отсюда и его зависимость от частоты (рис. 2.11). Здесь же дана кривая волнового сопротивления несимметричной микрополосковой линии.

Омические потери обоих типов линий примерно одинаковы. Возбуждать щелевую линию можно или микрокоаксиальным кабелем, или несимметричной линией. В первом случае внешний проводник коаксиала соединяют с одной металлической пластиной, внутренний — с другой.



Интересные возможности для создания миниатюрных СВЧ устройств открываются при объединении щелевой и несимметричной линий. В этих устройствах щель расположена на одной стороне подложки, полоска — на другой Изменяя расстояние между щелью и полоской, можно изменять связь между линиями. Таким образом, легко изготовить направленный ответвитель с распределенной связью.

Полосно-заграждающий фильтр (ПЗФ) можно построить, используя в качестве резонаторов резонансные щели, а в качестве возбуждающих резонаторы устройств — полоску на обратной стороне подложки (рис. 2.12, *а).* Полосно-пропускающий фильтр (ППФ) можно создать на основе щелевой линии (рис 2 12, б). Резонансными системами здесь также служат полуволновые щели.

Если в области эллиптически - поляризованного магнитного поля щелевой линии разместить поперечно-намагниченный феррит, то можно создать невзаимные устройства. В фазовращателях, изображенных на рис. 2 13, использованы железо-итгриевые гранаты (ЖИГ). Такой фазовращатель создает невзаимный фазовый сдвиг в 12 град/см. Наилучшие образцы фазовращателей создавали фазовый сдвиг в 28 град/см. Соответственно для создания гиратора (сдвиг 180°) длина фазовращателя должна быть равной 6,5 см.



Конструкция компланарного волновода (рис 2 14) также удобна для параллельного включения сосредоточенных элементов. Компланарный волновод легко возбудить с помощью коаксиального перехода. При этом центральный проводник коаксиальной линии *1* соединяется с центральной полоской волновода *2*. Такие переходы имеют удовлетворительные характеристики в широкой полосе частот.

На основе компланарного волновода также созданы невзаимные устройства. Так, в компланарном резонансном вентиле ферритовые пластины размещены в обеих щелях. Один из таких вентилей, выполненный на монокристаллической рутиловой подложке, при частоте *f* 6 ГГц имел прямые потери 2 дБ и обратные 37 дБ. Общая длина вентиля 20 мм. Ширина центральной полоски 0,76 мм, толщина подложки 0,63 мм. Ферритовые пластинки размером 0,25 × 0,13 × 15мм размещены в щелях волновода.

Фазовые характеристики поля в компланарном волноводе, как и в щелевой линии, рассчитывают по приближенным формулам. Волновое сопротивление волновода выражается через погонную емкость Сn и фазовую скорость Vф*:*

 (8)

где  Сn=(ε + 1) ε02a/b; a/b = k(n)/k′ (n);

n = a1/b1;  k′(n) = k(n′); k – полный элептический интеграл первого рода.

Значение волнового сопротивления при ε = 20, a1/b1 *=* 0.1 составляет примерно 50 0м.

Таковы основные параметры регулярных микрополосковых линий, которые являются элементной базой для построения сложных узлов СВЧ.

Делители мощности могут быть ненаправленными и направленными.

Ненаправленные делители используют для деления мощности на два канала или для суммирования мощностей двух сигналы. Они представляют собой тройники, т. е. шестиполюсные устройства. Как известно, шестиполюсные устройства не могут быть согласованы одновременно со всех трех плеч. Одновременное согласование со всех трех плеч приводит к развязке между какими-либо плечами. Однако со стороны одного или двух плеч такие тройники могут быть согласованы с помощью ступенчатых согласующих трансформаторов (рис. 2.15). Выбирая закон изменения волнового сопротивления трансформатора, можно обеспечить требуемую частотную характеристику делителя. Наибольшее применение нашли чебышевская и максимально-плоская характеристики. Расчет тройника включает расчет регулярной линии и ступенчатого трансформатора.

Наибольшее применение в микрополосковой технике нашли направленные кольцевые делители мощности с развязывающим сопротивлением (рис. 2.16). Их применяют для разветвления и суммирования сигналов в системах питания фазированных антенных решеток (ФАР), мощных усилителях на транзисторах, в смесителях, переключателях и т. п.



Значение волнового сопротивления кольца делителя с равным делением мощности равно . Развязывающее сопротивление *R =* 2Zo выполняется в виде поглощающей пленки. Длина полукольца . Типовые параметры делителя следующие: в полосе частот fmax/fmin = 1,4, Ксв ≤ 1,22, развязка выходных плеч более 20 дБ.

Кольцевые дели гели могут быть изготовлены и для неравного деления мощности, Р1/Р2*= п2.* В одном из таких делителей (рис 2.16, *б)* длины полуколец остаются равными четверчи длины волны в линии, а их волновые сопротивления соответственно равны

Отношение Р1/Р2 должно быть не более четырех. При большем соотношении мощностей делитель трудно согласовать с входными линиями.

Направленные ответвители и мостовые схемы. В микрополосковых линиях, как правило, используют направленные ответвители с распределенной связью. Ответвители этого типа (рис. 2.17) являются противонаправленными, т. е. у них отсутствует связь между плечами *1—4* и *2—3.* Исходной величиной для расчета ответвителя является переходное затухание *с* [дБ] = 10 lg P1/P2. По этой величине рассчитывают сопротивление связи и геометрические размеры полосок.



Из мостовых схем в микрополосковой технике наибольшее распространение получили шлейфные мосты (рис. 2.18) и гибридные кольца (рис. 2.19).

В простейшем случае двухшлейфного моста, называемого квадратным мостом, волновые сопротивления вертикальных плеч равны

Zo, а горизонтальных Z1 *=* Zo/sqr(2). Для расширения полосы рабочих частот и изменения степени деления мощности в выходных плечах применяют многошлейфные схемы. Устройство и принцип работы микрополоскового гибридного кольца такие же, как и у гибридного кольца на других типах линий.



Для уменьшения габаритов мостовых схем и кольцевых делителей в микрополосковом исполнении в метровом и дециметровом диапазонах можно выполнять на сосредоточенных *L-, С-* элементах. На центральной частоте четвертьволновому отрезку линии эквивалентны *П-* или *Т-* звенья фильтров нижних (ФНЧ) или верхних (ФВЧ) частот (рис. 2.20), если элементы ФНЧ, например, выбраны из условий

 (9)

Возможны различные варианты построения схем на сосредоточенных элементах. Кольцевой делитель, например, может быть реализован в соответствии со схемами, представленными на рис. 2.21.

Как видно из рис. 2.22, частотные зависимости делителей на сосредоточенных элементах выражены сильнее, чем зависимости делителей на отрезках линий. Однако в полосе 10% *Ксви<* 1,1, переходное затухание C31 ≤ 3,05 дБ, развязка плеч С23 >= 25 дБ. Следовательно, в этой полосе частот делители (сумматоры) на сосредоточенных элементах могут заменять схемы из отрезков линий.

В микрополосковых устройствах широко используют частотно-избирательные фильтры. ФНЧ обычно имеют ступенчатую структуру. Полосовые фильтры (ППФ.ПЗФ) выполняют на резонансных отрезках линий, связанных электромагнитной и кондуктивной связью. Строгая теория фильтров на микрополосковой линии отсутствует. Следовательно, и расчет фильтра будет приближенным. Экспериментальная настройка микрополоскового фильтра чрезвычайно затруднена из-за малых размеров всех элементов.

Кроме того, относительно высокие потери в микрополосковой линии не позволяют изготовить очень узкополосные фильтры. В последние годы исследуются вопросы построения узкополосных фильтров из диэлектрических резонаторов с полосой пропускания порядка 0,1%. Однако пока еще остается нерешенной проблема стабильности частотных характеристик таких фильтров из-за больших значений температурных коэффициентов емкости материалов с высокой диэлектрической проницаемостью.

### Управление амплитудой и фазой СВЧ сигналов.

В современных радиотехнических системах широко применяют устройства управления амплитудой (многоканальные переключатели, аттенюаторы, амплитудные модуляторы, ограничители) и фазой (фазовращатели) СВЧ сигнала.

Для этих целей используют СВЧ диоды. Управляющий СВЧ диод может включаться в линию последовательно или параллельно.

В микрополосковую линию бескорпусные диоды обычно включают параллельно.

Принцип работы многоканального переключателя (рис. 2.22) заключается в том, что при подаче положительного смещения диод открывается, его сопротивление становится намного меньше *Z0* и линия в этом сечении шунтируется диодом. Подводимая мощность отражается от этого сечения линии. Если же на диод подать отрицательное смещение, то он закрывается, его сопротивление становится большим и не шунтирует линию. В диоде поглощается небольшая доля переключаемой мощности. Это позволяет выполнять переключатели для относительно большой мощности на маломощных приборах. Если эта мощность мала (менее 1 Вт), то можно применять СВЧ диоды различных типов: варакторы, туннельные диоды и др. Если же уровень мощности превышает 1 Вт, то пригодны только *р—i—n* - диоды, способные рассеять до 10 Вт средней мощности. Необходимо отметить, что вносимые потери в переключателе в режиме пропускания LП и запирания LЗ связаны зависимостью



где Rmax, Rmin *—* сопротивления диода при подаче отрицательного и положительного смещения соответственно, К *—* качество р—i — n-диода.

Обычно переключатели разрабатывают на максимальный уровень переключаемой мощности. В этом случае режим работы переключателя целесообразно выбрать таким, чтобы в положениях «включено» и «выключено» в диоде поглощалась одинаковая мощность. При этом в диоде поглощается около 6% коммутируемой мощности. Потери в режиме «включено» составляют 0,5 дБ, в режиме «выключено» 26...28 дБ. Если требуется увеличить вносимые потери в режиме «выключено», вдоль линии можно установить несколько диодов на расстоянии четверти длины волны. Мощность управления одним р—i—n - диодом составляет 0,03...0,1 Вт.

Если нужно уменьшить мощность управления (например, при большом числе диодов), можно применить варакторы МДП. У этих приборов при изменении напряжения смещения изменяется емкостная проводимость. Ток утечки в них не превышает 10-14 А, из за чего требуемая мощность управления существенно уменьшается.

На основе одноканального переключателя созданы электрически управляемые аттенюаторы. В них напряжение смещения диода плавно изменяют в пределах *±*UсмПри этом вносимое затухание изменяется в пределах 0,5...28 дБ.

Если в линию включить варактор или диод с барьером Шоттки без внешнего смещения, то на нем за счет проходящего сигнала поддерживается постоянное напряжение порядка 1 В, т. е. происходит амплитудное ограничение сигнала. Такие схемы используются в РЛС для защиты входных цепей приемников и в ЧМ приемниках для устранения паразитной амплитудной модуляции.

Переключающие свойства *р—i—n* -диодов используют длч создания дискретных микрополосковых фазовращателей (рис. 2.23). Такие фазовращатели для упрощения управления ими строят in принципу двоичной разрядности (первый разряд обеспечивает изменение фазы на величину ΔΨ, второй — на 2 ΔΨ, третий — на 4 ΔΨ и т. д.).

На рис. 2,24 показаны 3 схемы одного разряда микрополосковых фазовращателей. В схеме, приведенной на рис. 2.24, *а,* изменение фазы обеспечивается переключением отрезков линии разной длины. В фазовращателе, изображенном на рис. 2.24, б, используются свойства моста (как правило, это микрополосковый квадратный мост).

В шлейфном фазовращателе (рис. 2.24, в) фаза изменяется за счет того, что с помощью диода на конце шлейфа создается режим короткого замыкания или холостого хода. При этом изменяется характер сопротивления, включенного в линию. Такой фазовращатель может давать любые дискретные значения фазы, кроме 180°. При значении фазы, близком к 180°, требуются слишком большие волновые сопротивления шлейфов, и их невозможно реализовать.



Достоинство полупроводниковых дискретных фазовращателей заключается в том, что точность установки фазы определяется не уровнем управляющего напряжения, а только фактом его наличия. Этим самым снижаются требования к управляющему устройству.

Современные ФАР требуют трех- или четырехрядных фазовращателей (Дф = 45 или 22,5°). Трехразрядный фазовращатель Х-диапазона имеет потери порядка 1,5 дБ.

### Интегральные СВЧ ферритовые приборы.

В технике СВЧ широко применяются ферритовые устройства. Это объясняется тем, что феррит является практически единственной освоенной в производстве средой с управляемым параметром μ, обладающей невзаимными свойствами. Попытки создать аналогичные приборы на магнитной плазме и сегнетоэлектриках хороших результатов пока не дали.

Переход к интегральному исполнению этих устройств представляет большой интерес. Трудность построения ферритовых приборов на микрополосковой линии связана с тем, что в ней магнитное поле линейно поляризовано. Для создания же невзаимных приборов требуется круговая или близкая к ней поляризация магнитного поля. Потому не все ферритовые СВЧ приборы можно выполнить в микрополосковой конструкции.

Наиболее разработаны мостовые трехплечие микрополосковые *Y*-циркуляторы (рис. 2.25). Одна из конструкций микроциркулятора выглядит следующим образом. На заземленное основание укладывается ферритовая подложка толщиной 0,6 мм. Центральная полоска шириною 0,064 мм напыляется на феррит. В центре 120°-ного разветвления полосковой линии напыляется металлический диск диаметром 0,58 мм. Постоянный магнит имеет диаметр, несколько больший диаметра центрального металлического диска. Таким образом, намагничивается только часть феррита непосредственно в области разветвления. Прямые потери в таком циркуляторе Х - диапазона не превышают 0,6 дБ, развязка плеч не менее 20 дБ.

При включении в одно плечо циркулятора согласованной нагрузки он превращается в вентиль.

## 4. Активные СВЧ устройства

### СВЧ полупроводниковые приборы.

СВЧ устройства в гибридном исполнении с полупроводниковыми активными элементами используют в основном в маломощных трактах радиопередающих устройств и в приемных трактах радиоэлектронной аппаратуры в качестве генераторов, модуляторов, усилителей и преобразователей.

К наиболее употребительным в настоящее время активным полупроводниковым элементам СВЧ можно отнести транзисторы и диоды с отрицательным сопротивлением разных типов. Кроме того, применяют диоды, имеющие нелинейную зависимость емкости *р—n* - перехода от напряжения, например параметрические диоды, варакторы и диоды с накоплением заряда (ДНЗ). За исключением параметрических усилителей и генераторов, устройства с нелинейной емкостью не обладают активными свойствами. Это пассивные умножители СВЧ, а также устройства для амплитудной, частотной и фазовой модуляции.

Рассмотрим кратко свойства СВЧ устройств, построенных на активных и нелинейных пассивных элементах.

Усилители СВЧ мощности на транзисторах применяют в метровом и дециметровом диапазонах при выходных мощностях от сотен ватт (в метровом диапазоне) до единиц и долей ватта на длинноволновой границе сантиметрового диапазона. Широкополосность таких усилителей составляет 10...15%. Коэффициент усиления от 20... ... 25 дБ в длинноволновом участке указанного диапазона, до единиц децибел в коротковолновой части этого диапазона. К.П.Д. = 15... ...50%, что заметно больше, чем у усилителей мощности, построенных на других полупроводниковых активных элементах СВЧ.

На транзисторах строят малошумящие усилители СВЧ вплоть до сантиметрового диапазона волн при коэффициенте усиления 20...30 дБ и коэффициенте шума 5...8 дБ. Кроме того, на транзисторах выполняют автогенераторы в диапазоне от метровых до сантиметровых волн как с механической, так и с электронной перестройкой частоты. В таких автогенераторах, как правило, используют внешние цепи обратной связи, что усложняет их по сравнению с диодными генераторами. К основным достоинствам транзисторных устройств СВЧ следует отнести повышенное значение К. П. Д. и обеспечение однонаправленных свойств усилителей без введения дополнительных невзаимных элементов.

Генераторы и усилители на диодах с отрицательным сопротивлением используют главным образом в сантиметровом и миллиметровом диапазонах. Принцип действия таких устройств основан на компенсации сопротивления потерь колебательной системы (с учетом сопротивления, вносимого нагрузкой) отрицательной активной составляющей полного сопротивления диода. При полной компенсации потерь в генераторе устанавливаются автоколебания. При частичной компенсации потерь происходит регенеративное усиление внешних колебаний. Для получения автоколебаний в диодном генераторе не требуется внешних цепей обратной связи. Регенеративные усилители не обладая однонаправленными свойствами, требуют использования невзаимных устройств, например, циркуляторов.

В диодных генераторах и усилителях СВЧ используют диоды с различной природой образования отрицательного сопротивления, а именно: лавинно-пролетные диоды (ЛПД), диоды с переносом электронов (ДПЭ), туннельные диоды (ТД).

На ЛПД строят генераторы с выходной мощностью единицы ватт в сантиметровом диапазоне и сотни милливатт в миллиметровом. Широкому применению усилителей на ЛПД препятствуют неудовлетворительные шумовые характеристики, обусловленные лавинным механизмом генерирования носителей заряда в этих диодах. Генераторы на ДПЭ в 3...10 раз уступают по мощности генераторам на ЛПД, однако ДПЭ характеризуются несколько лучшими, чем ЛПД, шумовыми свойствами: коэффициент шума усилителей на ДПЭ 10...15 дБ. Оба типа генераторов имеют приближенно одинаковый к. п. д., измеряемый единицами процентов.

Туннельные диоды применяют в малошумящих усилителях дециметрового и сантиметрового диапазонов. Коэффициент усиления таких усилителей составляет 10...20 дБ при коэффициенте шума 5...7 дБ. Использованию ТД в генераторах и мощных усилителях СВЧ препятствует малое значение рабочего напряжения на диоде (доли вольта), что вызывает необходимость увеличивать ток диода для увеличения мощности. В режиме больших токов и малых напряжений при М-образной вольт-амперной характеристике трудно обеспечивать устойчивость цепи питания ТД. Устойчивость цепи питания используемых на практике источников может быть обеспечена только при рассеянии существенной части мощности источника в стабилизирующем резисторе, а следовательно, при значительном снижении К. П. Д. генератора.

Наилучшими шумовыми свойствами по сравнению с рассмотренными обладают полупроводниковые параметрические усилители, коэффициент шума которых порядка 0,5...3 дБ. Усилители на параметрических диодах применяют в диапазоне от дециметровых до миллиметровых волн с коэффициентами усиления 15...40 дБ. В генераторах накачки параметрических усилителей могут быть использованы ЛПД и ДПЭ. К стабильности частоты, уровню мощности и спектральным характеристикам таких генераторов предъявляют жесткие требования.

Умножители СВЧ на варакторах и ДНЗ применяют обычно для умножения частоты колебаний транзисторных усилителей мощности. С помощью таких транзисторно-варакторных цепочек получают колебания в коротковолновой части дециметрового диапазона и в сантиметровом диапазоне с удовлетворительными для многих практических применений значениями мощности и к. п. д. На выходе варакторных умножителей, работающих с запертым *р — n* - переходом, могут быть получены колебания миллиметрового диапазона. Как уже отмечаясь, такие умножители не имеют усилительных свойств, коэффициент передачи по мощности у них всегда меньше единицы и тем меньше, чем больше коэффициент умножения.

### Особенности гибридных устройств СВЧ с активными и нелинейными элементами.

Полупроводниковые активные элементы СВЧ в настоящее время не могут быть выполнены интегрально с остальными элементами СВЧ устройства. Устройства СВЧ с полупроводниковыми элементами состоят из электромагнитных систем СВЧ, выполненных по тонкопленочной технологии, и навесных полупроводниковых приборов в обычном или бескорпусном исполнении, т. е являются гибридными. Основной задачей в этом случае является миниатюризация устройства. Малые размеры активных полупроводниковых элементов и ограниченность электронного К. П. Д. приводя к чрезмерной локализации тепловыделения и необходимости применять в случае больших мощностей рассеяния эффективные теплоотводы и устройства охлаждения, ограничивающие степень миниатюризации.

Возможности миниатюризации электромагнитных систем в пленочном исполнении связаны со следующим. Основным типом электромагнитной системы в пленочном исполнении является микрополосковая несимметричная линия. Колебательные цепи генераторов и усилителей СВЧ должны содержать резонансные отрезки линий. длина которых соизмерима с длиной полуволны. Для уменьшения эффективной длины волны в линии (примерно в 2,5 раза), а также для сокращения поперечных размеров линии (до десятых долей миллиметра) можно использовать тонкие диэлектрические подложки с большими значениями диэлектрической проницаемости (порядка 10). Однако столь малые поперечные размеры приводят к увеличению потерь проводимости. Кроме того, диэлектрики с большими значениями диэлектрической проницаемости обладают повышенными потерями. В результате добротность колебательных систем такого типа оказывается в среднем на 0,5... 1,5 порядка меньше, чем у волноводных и коаксиальных колебательных систем. В результате уменьшается электромагнитный К. П. Д. мощных усилителей и генераторов и ухудшаются шумовые свойства маломощных устройств.

В дециметровом диапазоне резонансные отрезки линий даже при использовании материалов подложек с большой диэлектрической проницаемостью получаются неприемлемо длинными. Поэтому в указанном диапазоне волн приходится отказываться от использования микрополосковых линий и строить колебательные системы на сосредоточенных индуктивных элементах в виде плоских спиралей в сосредоточенных конденсаторах навесного типа или в пленочном исполнении. Для уменьшения уровня излучения таких элементов их размеры должны быть достаточно малы по сравнению с длиной волны, а следовательно, поперечные размеры проводников (например, плоских спиралей) уменьшаются по сравнению с размерами полосковых линий, потери же проводимости соответственно увеличиваются. Тем не менее значения добротности сосредоточенных элементов могут быть порядка сотни (рис. 2.26). При малых значениях частоты добротность уменьшается из-за уменьшения реактивного сопротивления, а при больших значениях частоты — из-за увеличения потерь проводимости, вызванных скинэффектом, и главным образом потерь на излучение. Практически сосредоточенные индуктивные и емкостные элементы применяют на частотах, не превышающих 1 ГГц.

Отметим еще одну особенность гибридных СВЧ устройств трудность введения элементов настройки и регулировки электромагнитных систем. Введение навесных элементов механической регулировки резко ухудшает технологичность изделия. Неизбежный разброс параметров полупроводниковых элементов, а также ошибки изготовления при отсутствии регулировочных элементов могуг затруднить реализацию оптимальных режимов работы устройства. Поэтому желательно предусматривать элементы подбора параметров электро-магнитных систем, а также использовать электронные способы перестройки.

Итак, гибридные устройства СВЧ могут иметь худшие параметры, чем аналогичные устройства на объемных электромагнитных системах. Тем не менее их применение оправдывается существенным улучшением технологичности, а также уменьшением габаритов и массы, особенно для маломощных устройств.

### Конструктивные и топологические решения

При конструировании гибридных устройств СВЧ возможны разнообразные решения, различающиеся способами установки диэлектрических подложек с пленочными и навесными элементами в металлический корпус, способами соединения элементов, выполненных на отдельных подложках, а также способами крепления полупроводниковых приборов.

В маломощных устройствах полупроводниковые приборы можно навешивать на диэлектрическую подложку так же, как и пассивные навесные элементы. При повышенных мощностях желательно обеспечить контакт полупроводникового прибора с корпусом устройства, который в этом случае выполняет роль теплоотвода и радиатора. Для эгого в подложке делают отверстие, в котором и устанавливают полупроводниковый прибор. Соединение усчройств, выполненных на отдельных подложках, может быть либо с использованием коаксиальных разъемов, либо безразъемное. В последнем случае подложки соединяемых устройств располагают вплотную друг к другу в одной плоскости и паяют пленочные проводники и металлизированные основания подложек. При безразъемном соединении могут быть применены как отдельные металлические корпуса, так и один общий для нескольких подложек корпус.

При разработке топологии устройств учитывают требования к плотности размещения микрополосковых и других плeнoчныx элементов, требования минимизации неоднородностей при изгибах и ответвлениях, а также некоторые технологические требования, например, к минимальной ширине полоски или зазора между полосками. В некоторых случаях учитывают соображения, связанные с тепловым режимом устройства. Колебательные системы однокаскадного транзисторного усилителя выполнены на основе микрополосковых линий с использованием навесных конденсаторов в системе блокировки источника питания. Выводы транзистора соединяются с соответствующими контактными поверхностями, обозначенными буквами на рисунке

### Расчет геометрических размеров пленочных элементов.

В случае реализации электромагнитных систем СВЧ устройств с использованием отрезков несимметричных микрополосковых линий их геометрические размеры, необходимые для обеспечения заданных электрических характеристик, рассчитывают по формулам и графикам.

Значения пленочных индуктивных элементов, используемых в СВЧ диапазоне, лежат в пределах от единиц до нескольких десятков наногенри. Индуктивные элементы могут быть выполнены в виде отрезков пленочного проводника, а также в виде плоских спиралей.

Значение индуктивности [нГ] металлической полоски без учета влияния металлического основания подложки равно

 (10)

где *l*, o *—*длина и ширина полоски, мм

С учетом влияния металлического оспорения индуктивность рассчитывают по формле:

 (11)

где *h —* толщина подложки

Значение индуктивности в форме круглой или квадратной спирали равно

 (12)

где *k —* коэффициент *(k =* 5 для круглой и *k =* 6 для квадратной спирали), Dk—внешний диаметр (сторона) спирали, мм; dк — внутренний диаметр (сторона) спирали, мм; Nк — число витков. Для внешнего диаметра спирали справедлива формула

Dk-dk+(2Nk—1)sk+2ω, (13)

где sk — шаг спирали, мм; ω*—* ширина спиральной полоски, мм.

Число витков спирали

Nk = [(Dk+sk)-(dk+2ω)]/2sk, (14)

Добротность пленочных индуктивных элементов определяют как

 (15)

где k*' =* 2 для круглой и *k =* 1,6 для квадратной спирали; f— частота ГГц.

Погрешность расчета индуктивных спиральных элементов по приведенным формулам составляет *±* 10%. Для расчета геометрических размеров по заданному значению индуктивности следует пользоваться последовательными приближениями.

## 5. Автоматизированное проектирование типовых технологических процессов и систем производства РЭС

### Автоматизация проектирования технологических процессов механообрабатывающего производства деталей РЭС

**Принципы построения и общая структура САПР ТП механообработки.** В общем объеме трудовых затрат на изготовление РЭС ТП, изготовление деталей БНК РЭС методами формообразования занимают в среднем 15 – 20%. В состав ТП формообразования входят заготовительное производство (литье, прессование, штамповка) и механообработка (точение, сверление, фрезирование). Наиболее сложными для автоматизации проектирования деталей БНК РЭС являются ТП механообработки. В связи с этим, нами рассматриваются основные принципы и структура САПР ТП механообработки 3-го поколения.

Систему автоматизированного проектирования (САПР) технологии механообработки целесообразно ориентировать на функционирование в составе ГПС. Поэтому в основу построение системы положены результаты работ по декомпозиции процесса проектирования, созданию методического, лингвистического, алгоритмического и программного обеспечения для ТП САПР, выявлению мест визуализации и фиксации проектных результатов в целях управления процессом проектирования, обеспечению возможности проверки генерируемых моделей на адекватность.

При автоматизированном проектировании ТП изготовление деталей в условиях функционирования ГПС в комплексе задач значительное место занимают размерный анализ точности основных выходных параметров ТП (операционных размеров, припусков), а также оценка точности ТП в целом. Особо важное значение приобретают создание и реализация на ЭВМ формализованных моделей размерного анализа (синтеза), позволяющих проводить прогнозирование точностных характеристик параметров ТП на стадии проектирования, где поиск рациональных решений не связан со значительными материальными затратами.

Система автоматизирует решение следующих задач: технологический анализ чертежа с определением возможности обработки данной детали в условиях функционирования ГПС конкретной конфигурации; выбор рациональных видов и способов получения заготовки; компоновку ТП по этапам, выделение множества элементов, обрабатываемых на каждом этапе, и сравнение вариантов принципиальных схем ТП по экономическим критериям; выбор оборудования для выполнения каждого этапа; выбор маршрута обработки детали внутри этапа ТП; выбор системы оборудования и закрепления заготовки и модели оборудования на каждой операции; проектирование вариантов общего маршрута ТП с объединением операций по общности обрабатываемых элементов и поверхностей вращения, принятых в качестве баз; проведение размерного анализа для элементов поверхности вращения с учетом принятых в качестве баз или с учетом принятых в качестве баз плоскостей и требований взаимного расположения; назначение и анализ определенных линейных размеров с минимизацией состава технологических размерных цепей, замыкающими звеньями которых служат конструкторские размеры и припуски; определение излишеств, допусков и отклонений операционных линейных размеров посредством технологического размерного анализа, который в ходе проектирования маршрута изготовления детали обеспечивает назначение операционных размеров и оценку возможности их реализации на настроенном оборудовании автоматически; формирование инструментальных наладок и составление расчетно-технологических карт для операции, на которых применяются станки с ЧПУ; расчет режимов обработки и норм времени по операциям ТП; расчет себестоимости изготовления детали по вариантам и выбор из них варианта, имеющего минимальную себестоимость при заданной производительности; проектирование и выпуск управляющих программ для станков с ЧПУ с использованием САПР, например типа «Техран»; расчет накладок управляющих кулачков для токарно-револьверных автоматов с использованием систем RAKTA, RASKUL; печать технологической документации (маршрутных и операционных карт).

САПР позволяет осуществить «сквозное» автоматизированное проектирование ТП и механообработки деталей класса «тела вращения». Сквозной цикл включает выполнение конструкторского чертежа, закодированного в соответствии со специализированным формализованным языком, детали и ТП ее изготовления (входная информация), размерный анализ (синтез) точностных характеристик детали, генерацию вариантов маршрутов ТП с оценкой наиболее рациональных по экономико-технологическим критериям, а также разработку структур операций с минимизацией числа режущего инструмента, формированием инструментальных накладок и вычерчиванием операционных заказов на чертежно-графическом автомате. Результатом функционирования системы является комплект технологической документации (маршрутные и операционные карты), а также управляющие программы для операций, выполняемых на станках с ЧПУ.

### Автоматизация проектирования сборочно-монтажного и механосборочного производства

**Принципы построения и общая структура системы автоматизированного проектирования сборочно-монтажных процессов РЭС.** В общем объеме трудовых затрат на изготовление РЭС сборка и монтаж РЭМ-1, РЭМ-3 занимает от 45 до 80%. В состав ТП сборки и монтажа РЭС входят процессы: РЭМ-1 – изделия на печатных платах; РЭМ-2 – изделия без кинематики с объемным монтажом, с кинематикой, а также изделия из проводов и кабелей или с обмотками; РЭМ-3 – изделия с приводным монтажом.

Технологический процесс сборки и монтажа РЭС включает совокупность операций установки, соединения, формообразования, в результате выполнения которых элементы конструкции занимают относительно друг друга требуемое положение и соединяются способами, указанными в чертежах изделия. Составными частями сборки и монтажа являются разнообразные и физически разнородные процессы. Сборка и монтаж – завершающий этап изготовления изделия (РЭС). Требования к элементам конструкции, поступающим на сборку, отражаются на содержании ТП изготовления конструкций изделия в целом. Поэтому проектирование ТП сборки и монтажа РЭС должно учитывать факторы, которые затрагивают почти всю производственную систему предприятия.

Сборочно-монтажные работы являются многовариантными как по возможному составу и последовательности операций технологического процесса, так и по составу применяемой оснастки, оборудования, инструмента. Проектирование оптимального технологического процесса и оснащения сборки и монтажа требует трудоемких вычислений, и поэтому его целесообразно осуществлять с применением ЭВМ. Автоматизация технологического проектирования базируется на математическом моделировании производства, отражающем закономерности и связи между свойствами изделия и производственной системы в виде математических отношений. Эти отношения отражают реальное физическое содержание процессов производства. Не все факторы физического содержания сборки поддаются формализации и математическому моделированию, поэтому велика роль диалогового проектирования при разработке технологических процессов сборки и монтажа.

По содержанию решаемых задач автоматизированное проектирование ТП сборки и монтажа разделяется на три этапа: формализованное описание структуры и конструкторско-технологических свойств оценки сборки и монтажа; выбор схемы базирования и определение условий собираемости изделия на АСТО; синтез структуры ТП сборки и монтажа.

Указанные задачи решаются при условии, что состав сборочной единицы и схема ее сборки и монтажа уже определены. Однако выбор схемы технологического членения, сборки и монтажа связан с проектированием технологического процесса сборки. Поэтому возможны такие схемы технологического членения изделия и схема сборки и монтажа, при которых технологический процесс сборки и монтажа может быть реализован. Следовательно, выбор схемы технологического членения изделия осуществляется так: формируется состав сборочных единиц, входящих в изделие, и для каждой сборочной единицы проектируется ТП сборки и монтажа.

Если для сборочной единицы существует хотя бы один вариант технологического процесса сборки и монтажа, то такая схема технологического членения изделия возможна. Для выбора оптимальной схемы технологического членения РЭС сравнивают различные схемы членения изделия по технико-экономическим показателям, принятым в качестве критериев оптимальности. В этом случае необходим анализ всех возможных вариантов ТП сборки и монтажа для каждой сборочной единицы изделия. Таким же образом связан с проектированием ТП сборки и монтажа выбор схем сборки, базирования и оснащения сборочных работ. Все эти задачи должны решаться комплексно, на основе единой системы математического моделирования конструктивно-технологических свойств изделия, свойств технологических процессов и оснащения сборочно-монтажных работ. Исходными данными при решении задач являются данные о структуре и конструктивно-технологических свойствах изделия.

Программный модуль МП1 осуществляет контроль, кодирование и первичную обработку входящей в систему информации. Информация, поступающая с чертежами изделий и планово-производственными документами, сортируется, кодируется по видам типового элемента сборки (ТЭС), т.е. преобразуется из текстовой или графической в приемлемую для ЭВМ буквенно-цифровую форму в виде конструкторско-технологического кода (КТК). Технологические модули ПМ2 – ПМ10 проектируют процессы сборки и монтажа индивидуальные и типовые (групповые). Модуль ПМ2 формирует КТК изделия в целом на уровне ТЭС. Модуль ПМ3 обеспечивает проектирование микромаршрута i-го ТЭС, модуль ПМ4 – технологического сборочного маршрута в целом по совокупности ТЭС ().

Программный модуль ПМ5 осуществляет выбор стандартных АСТО и промышленных роботов, модуль ПМ6 – выбор станочных приспособлений и оснастки, модуль ПМ7 – вспомогательных и измерительных инструментов. Если в связи с особенностями изделий (объектов сборки) требуются специальные роботы или оснастки, то формируются заказы подсистемам проектирования специальной технологической оснастки, инструмента, оборудования.

Программный модуль ПМ8 служит для определения режимов и параметров сборочно-монтажных операций, ПМ9 – для нормирования технологических операций. Модуль ПМ10 формирует управляющие программы для функционирования АСТО и роботов.

### Автоматизация проектирования настроечно-регулировочных и контрольно-испытательных процессов

**Математические модели контроля и диагностики РЭС и их элементов.** Под объектом контроля и диагностики (ОКД) понимается РЭ изделия или его составная часть (РЭМ), техническое состояние которых определено ГОСТ 20911 – 75.

Настроечно-регулировочные и контрольно-испытательное (НРКИ) процессы охватывают все этапы производства РЭС и составляет в общем объеме работ 20 – 40%. Процессы контроля обеспечивают выявление групп ОКД, которые соответствуют техническим условиям (ТУ). В ходе регулирования РЭС обеспечивается доведение эксплуатационных показателей ОКД до их значений, заданных по ТУ, на основе изменения регулировочных параметров. Процесс настройки направлен на поиск (обнаружения) дефектов и их устранения. Контрольно-испытательные работы связаны с проведением технологического прогона РЭС, в ходе которого «проявляются» дефекты в ОКД, характеризующие отказами по показателям качества.

Указанные процессы реализуются с помощью производственной системы (ПС) НРКИ работ. Технологическое проектирование НРКИ процессов и реализующих их ПС, особенно в рамках систем автоматизированного проектирования, требует разработки комплексов математических моделей ОКД и НРКИ процессов и систем. Остановимся на рассмотрении указанных комплексов моделей подробнее.

Под формализованным описанием (математическая модель или комплекс моделей) ОКД будем понимать знаковые или другие модели описания, используемые при определении изменения показателей назначения и дефектов в изделии, которые задаются исходной конструкторской документацией (принципиальные электрические, структурные и математические схемы, конструкторские чертежи, технологическая документация и др.). Анализ основных моделей, применяемых при формализованном описании ОКД, показывает, что существует аналитические, функциональные, функционально-логические, логико-вероятностные и другие классы моделей, которые используются далее.

При формализованном описании ОКД необходимо учитывать параметры и свойства, присущие им на этапе производства: наличие неодиночных дефектов; свойства изделий, которые являются источниками дефектов в нем; структуру изделий как объектов сборки, что определяет возможность замены дефектных элементов РЭС.

В связи с этим при построении математических моделей ОКД необходимо: определить структуру ОКД, являющуюся адекватным отображением принципиальных, функциональных схем, а также сборочного чертежа РЭС; описать функционирование элементов декомпозиционного множества, на котором задана структура ОКД, и определить понятия их технического состояния; определить вероятностное описание состояний ОКД и их элементов на любом уровне глубины поиска; построить информационную модель ОКД, содержащую перечень сведений, достаточных для их использования в задачах автоматизированного проектирования НРКИ процессов (систем) производства РЭС.

Для описания структуры ОКД, подлежащего определению его технического состояния, введем понятие типовых элементов диагностики (ТЭД) и замены (ТЭЗ).

Под ТЭД понимается элемент принципиальной электрической функциональной схемы, определяющей операцию преобразования или передачи сигнала А и являющийся объектом контроля или диагностики.

ТЭЗ представляет собой элемент конструкции РЭС того или иного уровня сложности (деталь, сборная единица), используемый при замене дефектного элемента в процессе его устранения.

Как показывают определения, ТЭД и ТЭЗ являются элементами декомпозиционных множеств, однозначно связанных друг с другом. Тем самым в зависимости от частных задач, возникающих при прогнозировании и управлении качеством, может быть использованы различное структурное и функциональное описание ОКД, заданное на введенных декомпозиционных множествах и зависящее от определения его технического состояния. Так в задачах контроля и диагностики должны быть использованы ТЭД и модели, построенные на их основе, а в задачах устранения дефектов – ТЭЗ и соответствующие модели. При функциональном описании ОКД в различных задачах технологии РНКИ работ могут быть использованы различные модели ОКД в зависимости от того, какие используются виды технического состояния (работоспособность и неработоспособность, исправность и неисправность, правильное и неправильное функционирование). Количественно все виды технического состояния ОКД определяется заданием в НТД технических требований на контролируемые параметры (показатели качества) ОКД.

Контролируемые параметры ОКД могут классифицироваться по различным признакам: по виду контролируемого параметра – размерные (геометрические), физические (физико-механические и физико-химические) и электрические параметры; по отношению к назначению контролируемые параметры разделяют на определяющие, т.е. направленные на определение вида технического состояния, и вспомогательные, используемые для поиска места дефекта.

Основываясь на введенных определениях, рассмотрим математические модели ОКД, используемые для оценок работоспособности, регулировки, поиска и устранения дефектов.

Анализ принципов построения и реализации многих классов ОКД, в том числе измерительной и специальной, показывает, что практически все они построены с использованием структурных моделей, элементы которых описываются полными моделями. При решении задач проектирования НРКИ процессов необходимо описание моделей функционирования ОКД относительно различных уровней структурной детализации описания оператора ОКД, что особенно важно при решении задач поиска и устранения дефектных элементов. Действительно, при рассмотрении ОКД необходимо определить его структуру.

## Список литературы

1. Бондарекко О. Е., Орлов Б.Н., Бутузов С. С., Оснпов В. И. Исследование адгезии толстых пленок меди. — В i\h • Сборник научных трудов по проблемам микроэлектроники Сер. физ -мат Вып 14 МИЭТ, 1973

2 Стиглиц М*.* Формирование частотной характеристики связанных диэлектрических резонаторов. — «ТИИЭ1 ». 1973, т. 61, №3, с. 169.

3. ВарфоломеевИ. H**.,** Дмитриев С. Д., Никонов В. П Оптимизация потерь в полосе прозрачности микрополосковых ППР с параллельно связанными полуволновыми резонаторами. —«Электронная техника Сер II», 1975, вып. 1, с. 23—29.

4. Коробовский С. Б., Шагеданов В. И. Ферритовые циркуляторы и вентили. М., «Сов радио», 1979

5. Диодные генераторы, усилители и умножигели СВЧ Конспект лекций. Под ред. Земцова Г П МАИ, 1976 Авт.. H. С Давыдова, Г П Зем-нов, В. К. Трепаков, В Н. Шкаликов

6. Бартон Д. Радиолокационные системы Пер с англ Под ред. К. Н. Трофимова. М., Воениздат, 1967.

7. В. Н. Фролов, Я. Е. Львович, Н. П. Меткин, Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС. Москва., ВШ. 1991