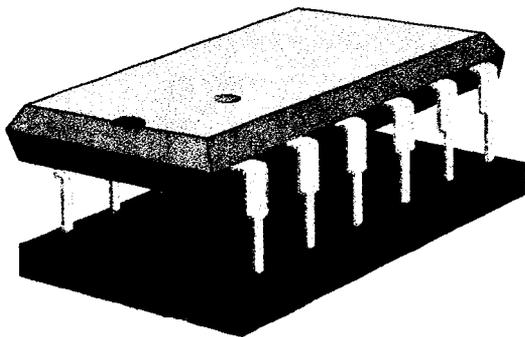


СТАУ:6
П32

М.Н.Пиганов

Технологические основы
обеспечения качества
микросборок



С а м а р а
1 9 9 9

Министерство общего и профессионального
образования Российской Федерации

Самарский государственный аэрокосмический
университет имени академика С.П. Королева

М.Н. Пиганов

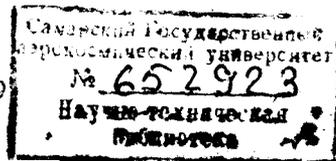
Технологические основы обеспечения качества микросборок

Учебное пособие

Рекомендовано учебно-методическим
объединением по образованию в
области автоматки, электроники,
микросэлектроники и радиотехники
Минобразования России в качестве
учебного пособия для студентов вузов,
обучающихся по направлению 551100
– “Проектирование и технология
электронных средств” и
специальностям 200800 и 220500

Уч. пособие. Ст. курсов

Самара 1999



УДК 621.382.049.77.002

Технологические основы обеспечения качества микросборок:

Учеб. пособие / М.Н. Пиганов. Самар. гос. аэрокосм. ун-т.

Самара, 1999. – 231 с.

ISBN 5-7883-0088-6

В пособии рассмотрены факторы, обеспечивающие качество микросборок (МСБ) в процессе их производства. Дан анализ проблемы качества, рассмотрены уровни функционально-конструктивной сложности РЭС, особенности микросборок с нерегулярной структурой, показатели их качества. Описаны технология производства МСБ, вопросы анализа, оптимизации и аттестации технологических процессов. Приведены методология и алгоритмы анализа дефектов и отказов микросхем. Дана классификация и описаны методы подгонки МСБ. Показано влияние материалов пленочных элементов на качество микросборок. Рассмотрены методы контроля и прогнозирования качества МСБ, модели управления качеством.

Табл. 29. Ил. 18. Библиогр. 336.

Рецензенты: кафедра технологии электронных средств и материалов электронной техники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (зав. кафедрой – докт. техн. наук, профессор Ястребов А.С.), докт. техн. наук, профессор Козлов А.Н.

ISBN 5-7883-0088-6

© М.Н. Пиганов, 1999

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 1999

ВВЕДЕНИЕ

Выход промышленности из кризиса при открытой рыночной экономике практически невозможен без решения проблемы повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. В целом это проблема технико-экономическая, а не просто управленческая. Технически она решается при проектировании, изготовлении, испытании, эксплуатации и ремонте. Экономически — через цену изделия, отражающую его потребительские свойства.

Проблема повышения качества остро стоит прежде всего перед наукоемкими отраслями техники, к которым относятся и микроэлектроника. Микроэлектроника развивается как самостоятельное направление, объединяющее сложный комплекс физических, химических, технологических, материаловедческих, схмотехнических, конструкторских и кибернетических исследований и промышленных реализаций, обеспечивающих создание высоконадежных, малогабаритных и высокоэкономичных радиоэлектронных средств (РЭС).

Основными изделиями микроэлектроники являются интегральные микросхемы (ИМС), имеющие высокую потенциальную надежность. Высокая потенциальная надежность, как один из обобщающих показателей качества ИМС, обусловлена, в первую очередь, совместимостью используемых материалов, однотипностью элементов, малым числом межэлементных соединений, групповой технологией изготовления.

Рост функциональной сложности РЭС неизбежно требует увеличения степени интеграции ИМС. При этом становится все сложнее получить наибольший эффект при существующем разделении труда между разработчиками и изготовителями микросхем и другой элементной базы с одной стороны, и разработчиками и изготовителями аппаратуры с другой.

Повышение степени интеграции ИМС объективно способствует формированию у данной группы элементной базы узкоспециализированных функциональных свойств. При этом они теряют свойства изделия широкого применения. Сужение области их применения ведет к уменьшению объемов производства и росту их стоимости. Однако это не самая главная потеря для изделий высокой степени интеграции. Главное заключается в уменьшении спроса на такие ИМС со стороны разработчиков и изготовителей аппаратуры. Это связано с тем, что ИМС такого класса разрабатываются без полного учета особенностей конкретных РЭС. Поэтому разработчики и изготовители РЭС стали стремиться к созданию собственной элементной

базы. Наиболее типичной элементной базой в таких случаях являются микросборки (МСБ). В ряде случаев МСБ по своим показателям приближаются к устройствам высоких структурных уровней.

Принято считать, что качество ИМС и МСБ определяется их конструкцией, исходными материалами и компонентами, сложностью и стабильностью технологических процессов. Главным звеном при этом является технология изготовления.

Технологические аспекты обеспечения качества МСБ включают широкий комплекс вопросов и задач, связанных с выбором технологических маршрутов, отработкой технологических операций и приемов, оценкой их точности и стабильности, окончательным выбором материалов и конструкции, разработкой методов и средств контроля, выбором показателей качества, анализом дефектов и отказов, классификацией по уровням качества и надежности, прогнозированием показателей качества, выбором или разработкой моделей и систем управления качеством.

Автор выражает признательность АООТ Самарский завод «Экран» (генеральный директор – академик АМТН Тюмин А.А.) за финансовую поддержку в издании пособия, а также Киселеву С.С., Белоглазову Д.И., Зайцеву В.Ю., Прокаеву Е.А., Фролову Д.В., Мурашеву М.В., Бабинину С.А. за помощь в оформлении рукописи.

1. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ ИСПОЛНЕНИИ

1.1. Уровни функционально-конструктивной сложности радиоэлектронных средств

В соответствии с ГОСТ 26632-85 радиоэлектронное средство (РЭС) – это изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники.

По уровню функциональной сложности радиоэлектронные средства подразделяются на радиоэлектронные функциональные узлы (РЭФУ), радиоэлектронные устройства (РЭУ), радиоэлектронные комплексы (РЭК) и радиоэлектронные системы (РЭ – системы) [1].

Радиоэлектронный функциональный узел – средство, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции, реализующую функцию преобразования сигнала и не имеющую самостоятельного эксплуатационного применения. Примерами РЭФУ являются усилитель, модулятор и т.д. Эти узлы используются в РЭС более высоких уровней функциональной сложности и самостоятельного применения не имеют.

Радиоэлектронное устройство – радиоэлектронное средство, представляющее собой функционально законченную сборочную единицу, выполненную на несущей конструкции и реализующую функции передачи, приема, хранения или преобразования информации. Примером РЭУ может служить радиомаяк, функцией которого является излучение радиосигналов, содержащих информацию для управления самолетом при заходе на посадку и во время посадки. Он состоит из совокупности функционально законченных сборочных единиц антенного и передающего устройств – и может иметь самостоятельное применение или использоваться в составе РЭК или РЭ – систем.

Радиоэлектронный комплекс – радиоэлектронное средство, представляющее собой совокупность функционально связанных РЭУ, обладающее свойством перестройки структуры в целях сохранения работоспособности и предназначенное для самостоятельной эксплуатации в соответствии с функциональным назначением. Примером РЭК является бортовой радиолокационный комплекс, служащий для обнаружения и опознавания объекта и определения его местоположения (координат). Он содержит в своем составе дальномер, высотомер, устройство опознавания.

Радиоэлектронная система – радиоэлектронное средство, представляющее собой совокупность функционально

взаимодействующих РЭУ и РЭК как единого целого, обладающего свойством перестройки структуры в целях рационального выбора и использования входящих в него средств в процессе эксплуатации. В качестве примера можно привести аэродромную автоматизированную радиоэлектронную систему управления воздушным движением, которая производит измерение траекторных параметров самолетов и осуществляет управление самолетами. В состав этой системы входят наземные радиолокационный и вычислительный комплекс и бортовые радиоэлектронные комплексы.

В состав РЭК и РЭ – систем радиоэлектронных устройств и узлов могут входить механические, электромагнитные и другие средства, без которых невозможна их эксплуатация.

В конструкциях радиоэлектронных средств различают несколько конструктивно-технологических уровней. Исходные конструктивно неделимые элементы – интегральные микросхемы, функциональные элементы, активные и пассивные электрорадиоэлементы – составляют нулевой уровень конструктивной сложности. В процессе создания аппаратуры их объединяют в более сложные конструкции – ячейки. Радиоэлектронные ячейки предназначены для реализации функций передачи, приема, преобразования или хранения информации или преобразования сигналов. Ячейки выполняются на основе несущей конструкции первого уровня.

Несущей конструкцией (НК) называется элемент (или совокупность элементов конструкции), предназначенный для размещения радиоэлектронных средств и обеспечения их устойчивости и прочности в заданных условиях эксплуатации. Несущая конструкция, габаритные размеры которой стандартизированы, называется базовой НК. Несущая конструкция первого уровня предназначена для размещения элементов нулевого уровня и входит в НК более высокого уровня.

Радиоэлектронные ячейки могут содержать десятки, а иногда и сотни элементов нулевого уровня. Их несущие конструкции могут быть выполнены в виде рамки кассеты или печатной платы. Несущими конструкциями ячеек корпусированных ИМС средней степени интеграции служат двусторонние и многослойные печатные платы. Ячеек с применением больших интегральных схем и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС) – многослойные печатные платы на металлических рамках, металлические подложки или керамические платы.

Для бортовой МЭА в качестве несущей конструкции и теплоотводящего основания ячейки используют металлическую рамку из легких сплавов. Рамка имеет ребра жесткости и теплопроводящие шины толщиной 0,5 – 0,8 мм, на которых размещаются бескорпусные ГИС.

Коммутация между ГИС осуществляется с помощью двусторонней печатной платы, размещенной с обратной стороны рамки.

Второй уровень конструктивной сложности представляют радиоэлектронные блоки, которые также являются конструктивно и функционально законченными сборочными единицами. Блоки объединяют ячейки механически и обеспечивают электрическую связь ячеек между собой. Несущая конструкция второго уровня может быть выполнена в виде панели рамы, корпуса блока и др. Таким образом, радиоэлектронным блоком называется РЭС, выполненное на основе несущей или базовой несущей конструкции второго уровня.

Третий уровень конструктивной сложности РЭС представляет собой совокупность радиоэлектронных блоков и ячеек и в отличие от предыдущих уровней предназначается для самостоятельного применения. Несущая конструкция третьего уровня может быть изготовлена в виде рамы, каркаса, стеллажа, шкафа, стойки, пульта и т.д.

Конструктивно радиоэлектронные комплексы и системы состоят из набора несущих конструкций второго и третьего уровней конструктивной сложности и включают в себя механические, транспортные средства, источники энергоснабжения.

1.2. Конструктивно-технологические особенности микросборок с нерегулярной структурой

Основным изделием микроэлектроники является интегральная микросхема. В соответствии с ГОСТ 17021-75 под интегральной микросхемой понимают микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала или накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов или элементов и компонентов, или кристаллов, которое с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматривается как единое целое.

В зависимости от конструктивно - технологического варианта реализации микросхемы делят на полупроводниковые, пленочные и гибридные

Гибридная ИМС – это интегральная микросхема, содержащая кроме элементов компоненты и (или) кристаллы.

Частным случаем гибридной интегральной микросхемы (ГИМС), а точнее ее дальнейшим развитием, является микросборка. МСБ – это микроэлектронное изделие типа ГИМС или БГИМС, выполняющее определенную функцию и состоящее из элементов, компонентов, устройств функциональной электроники, интегральных микросхем (корпусированных или бескорпусных) и других электрорадиоэлементов

(в том числе и дискретных) в различных сочетаниях, разрабатываемое и изготавливаемое разработчиками конкретной аппаратуры для улучшения показателей ее миниатюризации.

Подчеркнем, что МСБ изготавливают для конкретной микроэлектронной аппаратуры (МЭА). Они являются изделиями частного применения, изготавливаются на уровне полумонтажных, в отличие от ГИМС и БГИМС, представляющих собой самостоятельные, функционально и конструктивно законченные изделия общего (или более общего) применения.

Процесс создания микросборок на предприятиях, изготавливающих МЭА, часто называют «вертикальной интеграцией». Этот процесс принял в последние годы широкое распространение [2].

В зависимости от степени интеграции микросборка может выполнять функции устройства, блока или субблока.

Наиболее близкими к МСБ изделиям являются гибридные интегральные функциональные устройства (ГИФУ). ГИФУ могут содержать не только бескорпусные и корпусированные ИМС и различные электрорадиоэлементы, собранные на одной коммутационной плате, но и несколько коммутационных плат, конструктивно и электрически связанных между собой. Они, так же как и микросборки, не могут быть использованы для самостоятельного применения вне той аппаратуры, для которой созданы. Этим они функционально и конструктивно отличаются от радиоэлектронных ячеек [3].

Для МСБ и ГИФУ высокой степени интеграции необходимо использование многоуровневой разводки. Поэтому возникает необходимость замены обычных плат ГИС многослойными коммутационными платами [4].

При создании космических РЭС и аппаратуры специального применения широко используется микросборки с нерегулярной структурой. На рисунке 1 приведено схематическое изображение такой МСБ. Основными признаками нерегулярности являются следующие:

- 1) наличие плат, изготовленных по разным технологиям (например, тонкопленочной и толстопленочной);
- 2) наличие плат (или микроплат) с прецизионными пленочными элементами;
- 3) широкий диапазон номиналов резисторов, для реализации которого необходимо использовать два и более резистивных материала;
- 4) наличие обычных дискретных электрорадиоизделий;
- 5) сочетание поверхностного монтажа с монтажом ИМС и ЭРЭ в отверстия.

Наличие хотя бы одного из перечисленных признаков позволяет отнести МСБ к классу нерегулярных.

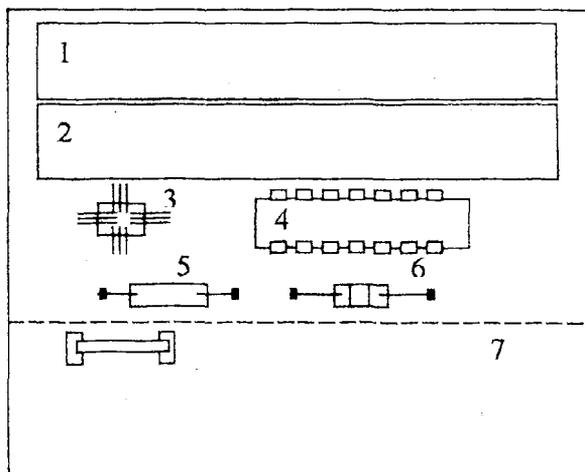


Рис. 1. Схематическое изображение микросборки с нерегулярной структурой:

1 — плата с тонкопленочными элементами; 2 — плата с тонкопленочными прецизионными элементами; 3 — бескорпусная ИМС; 4 — корпусированная ИМС; 5, 6 — дискретные элементы; 7 — пленочные элементы на основной подложке

1.3. Микросборки с прецизионными элементами

Для построения измерительных, телеметрических и связных устройств, блоков автоматики и импульсной техники, источников питания, бытовой радиоаппаратуры, периферийных устройств вычислительных средств широко используются полупроводниковые и гибридные микросхемы, а также микросборки. К первым относятся операционные усилители, умножители напряжений, стабилизаторы тока и напряжений, компараторы и др. Изделия второй группы не являются функционально законченными и изготавливаются в форме полуфабрикатов для конкретных радиоэлектронных средств. Применение прецизионных микросхем, микросборок, отдельных плат и микроструктур позволяет улучшить точностные, эксплуатационные, динамические, надёжностные и другие показатели РЭС, повысить их технологичность, унифицировать электрические схемы многих устройств.

Прецизионные свойства таких микросхем и микросборок могут быть обеспечены специальными схемотехническими решениями, применением высокоточных и высокостабильных элементов и структур, либо совместным использованием схемотехнических решений и точных

элементов. При проектировании и изготовлении прецизионных микросборок наиболее распространен второй путь — использование высокоточных элементов. Третий путь чаще используют при создании прецизионных гибридных микросхем. В полупроводниковых микросхемах прецизионность обычно достигается за счет схемотехнических приемов.

В качестве примера можно рассмотреть некоторые основные схемотехнические приемы улучшения качества и повышения прецизионности параметров операционного усилителя (ОУ).

Несимметрия монтажа электрических цепей, большой разброс и нестабильность параметров элементов полупроводниковой микросхемы и внешних цепей усиливают действие помех.

Для снижения влияния наводок на внешние цепи, уменьшения действия собственных шумов вводят глубокую отрицательную обратную связь.

Для ослабления синфазного входного сигнала и уменьшения его влияния на выходное напряжение используют инвертирующее включение операционного усилителя. Улучшению статических показателей ОУ способствует уменьшение напряжения смещения нуля $U_{см}$ и его температурного дрейфа. Для этого входные каскады формируют на основе биполярных транзисторов. Кроме того, клеммы питания усилителя шунтируют конденсаторами, что позволяет уменьшить амплитуду высокочастотных составляющих помех от источника питания. Целесообразно также уменьшить емкость корректирующего конденсатора. С целью устранения высокочастотных гармоник на входе ОУ и в цепи питания устанавливают полосовые фильтры.

Для уменьшения ошибок, вызванных входными токами, осуществляют выравнивание суммарных сопротивлений резисторов, подключенных ко входам ОУ. Это удобно при постоянной величине сопротивления резистора $R_{об}$ в цепи обратной связи. Если это сопротивление изменяется, то компенсация нарушается. Для устранения этого недостатка в цепь инвертирующего входа включается биполярный транзистор, который отличается от транзисторов входного каскада типом проводимости.

Увеличить входной импеданс $R_{вх}$ ОУ можно путем использования буферных входных каскадов на полевых транзисторах. Однако при этом неизбежно возрастают ошибки $U_{см}$ и масштабного коэффициента ΔK_U . Для их уменьшения необходимо, чтобы напряжение на резисторе R_1 и системе затвор-исток транзистора VT2 были равны. При этом у обоих транзисторов напряжения затвор-сток будут равны, а смещение входа ОУ при $U_{вх}=0$ будет минимальным. При постоянном значении коэффициента усиления K_U для увеличения входного импеданса

требуется увеличивать сопротивление R_{cc} и R_o (входное сопротивление). Однако повышение величины сопротивления полупроводникового резистора ведет к увеличению разброса удельного и номинального сопротивления, снижению его стабильности. В этом случае можно использовать Т-образный мост, который включают в цепь обратной связи.

В ряде случаев для увеличения $R_{вх}$ используют неглубокую положительную обратную связь.

Компенсировать дрейф модуля коэффициента усиления можно выбором внешнего конденсатора, корректирующего амплитудно-частотную характеристику ОУ, с требуемой температурной зависимостью емкости.

Динамические показатели качества ОУ улучшают путем соответствующего выбора методов и резистивно-емкостных цепей коррекции, параметров элементов этих цепей, а также различными схемотехническими приемами (использованием дополнительных высокочастотных каскадов, последовательным включением нескольких ОУ, включением параллельных каналов, введением внутренней коррекции и др.).

Для повышения прецизионности и качества эксплуатационных показателей ОУ, целесообразно увеличивать допустимую амплитуду входных напряжений. Это достигается шунтированием входов ОУ делителем или введением следящих обратных связей по цепям питания. Для этого требуются прецизионные резисторы R_1, R_2, R_3, R_4 .

Улучшение выходных параметров ОУ может быть обеспечено подключением мощного повторителя напряжения, усилителя тока и др. Амплитуда выходного напряжения операционного усилителя ограничена допустимым напряжением его источников питания. Для увеличения амплитуды выходного напряжения к ОУ подключают каскад работающий от большего напряжения питания. Так в схеме инвертирующего усилителя, построенного по данному принципу, коэффициент усиления K_u определяется соотношением R_3/R_2 . Если разброс номиналов сопротивлений этих резисторов не превышает $\pm 0,25\%$ и напряжение смещения нуля ОУ отрегулировано, то нелинейность усилителя не будет превышать $0,4\%$ при амплитуде выходного напряжения $\pm 20В$.

Решение многочисленных задач науки и техники, например, обработки результатов экспериментов в реальном масштабе времени, математического моделирования сложных динамических систем, требует совместного использования различных аналоговых и цифровых устройств. Такое сочетание позволяет реализовать основные достоинства цифровых и аналоговых устройств - высокое быстродействие и точность.

Многие цепи аналоговых устройств, например эталонные датчики и

элементы, воспроизводящие меру или эквивалент измеряемых величин, декодирующие сетки аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и делители напряжения требуют высокой идентичности статических и динамических характеристик РС – схем, используемых при их построении.

Практическая реализация указанного класса схем может быть осуществлена с учетом специфики микроэлектронной технологии, в частности, гибридных микросхем.

В таблице 1 приведены основные параметры известных прецизионных пленочных резистивных и емкостных микросхем и плат МСБ.

Таблица 1

Основные параметры лучших отечественных и зарубежных аналогов

Аналог	Состояние разработки	Удельные характеристики	Диапазон номиналов	Точность, %	Технология получения
K224HP2	Серийный выпуск	1 кОм/м	0,3-95кОм	±2,5	ГП
305HP7	--/--	-	30-571 Ом	±1	-
I-M-Strips	--/--	-	10-10 ⁸ Ом	±(1-25)	-
TK Temp-Stable	--/--	-	до 10 ⁷ Ом	±(0,01-1)	ДП*
Обь	ОКР	-	1-50 кОм	±10	ГП
Анадырь	ОКР	-	1-50 кОм	±1	-
-	Научное сообщение	1-2 кОм/м	-	±0,01	-
-	--/--	-	70-2,6-10 ⁴ пФ	±0,1	-
2HE281	Серийный выпуск	-	12000 пФ	±20	-
-	Научное сообщение	-	1-170кОм	±0,02	-

* - дискретно-пленочная

Отечественной промышленностью выпускаются аналоговые

пассивные микросхемы, выполненные по гибридно-пленочной (ГП) технологии и имеющие следующее функциональное назначение: наборы резисторов (серии К 224, 303, 305), наборы элементов (серии К 260, 260), матрицы комбинированные и конденсаторные сборки (серии К 228, 228), декодирующие резисторные матрицы, декодирующие двоично-десятичные матрицы, последовательные делители напряжения (серии 301, 302), 5, 7, 8 и 9 разрядные декодирующие цепи (серия 304), звенья для построения активных полосовых фильтров (серия 273).

Максимальная точность изготовления резисторов составляет $\pm 1\%$ для 305 серии. Микросхема 305HP7 содержит 6 резисторов с диапазоном номинальных значений от 30 до 571 Ом. Суммарное сопротивление всех резисторов составляет 2239 Ом. Более высокий диапазон сопротивлений - от 0,3 до 95 кОм обеспечивают микросхемы серии К224. Однако они имеют относительно низкую точность изготовления. Так, для микросхемы К224HP2, содержащей 17 резисторов, она составляет $\pm 2,5\%$. Это наилучшее гарантируемое значение для микросхем данной серии. Минимальное значение ТКС ($\pm 100 \cdot 10^{-6}$ 1/град) обеспечивает резисторные микросхемы 301 серии.

Наилучшими параметрами среди выпускаемых отечественной промышленностью конденсаторных сборок обладают конденсаторы 228 серии. Конденсаторные сборки К2HE281 и 2HE281 содержат 5 конденсаторов с рабочим напряжением не более 15 В, тангенсом угла диэлектрических потерь не хуже 0,035; емкость каждого конденсатора порядка 12000пФ; суммарная емкость всех конденсаторов порядка 60000пФ; точность изготовления не гарантируется. А прецизионные конденсаторные микросхемы отечественной промышленностью не выпускаются. По прецизионным ТПК имеются лишь отдельные научные сообщения. Были получены прецизионные ТПК с диапазоном номиналов от 70 до 26000 пФ. Точность подгонки $\pm 0,1\%$.

Среди известных из отечественной литературы аналогов по прецизионным резисторам следует отметить микросхему [3], в которой тонкопленочные резисторы имеют диапазон номинальных значений от 1 до 170 кОм, точность изготовления $\pm 0,02\%$. Можно отметить также работы по разработке тонкопленочных делителей напряжения [3]. Для изготовления ТПК был использован металлопленочный сплав с удельным сопротивлением 0,01 Ом/кв.см. Точность подгонки номиналов сопротивлений составляла $\pm 0,01\%$.

К сожалению, промышленностью выпуск таких микросхем не освоен. В 1980 году были завершены разработки микросхем по темам "Объ", "Анадырь" и др. для применения в точных цифроаналоговых преобразователях (ЦАП) и АЦП. Для изготовления 14 и 16 разрядных резисторных двоичных делителей напряжения используются резисторные микросхемы с диапазоном номинальных значений от 1 до

50 кОм, ТКС $\sim \pm(50+200) \cdot 10^{-6}$ 1/град и точностью изготовления $\pm(1+10)\%$. Выпуск был осуществлен в 1981 год. Среди иностранных аналогов следует назвать резистивные пленочные цепочки с номиналами резисторов от 10 Ом до 1 МОм имеющих ТКС $100 \cdot 10^{-6}$ 1/град. Однако точность изготовления резисторов не гарантируется. Фирма TRW/JRC Fixed Resistors выпускает цепочки тонкопленочных резисторов с номиналами от 51 Ом до 51 кОм (при 13-15 резисторах). Дрейф сопротивления в течение 8000ч при максимальной нагрузке (0,125 Вт на резистор) имеет типичное значение 0,25% и не превосходит 1%. Тонкопленочные резисторные цепочки, получившие название I-M-Strips имеют диапазон номиналов от 10 Ом до 100 МОм и точность изготовления от 1 до 25%. Дискретные прецизионные пленочные резисторы типа TK Temp-Stable имеют ТКС ~ 5 и $10 \cdot 10^{-6}$ 1/град в интервале температур от -55 до +125°C и точность изготовления от 1 (стандартные) до 0,01%. Временной дрейф лучше 0,05% на каждые 2000ч работы. Резисторы выпускаются номиналами до 10 МОм.

Анализ представленных выше данных позволяет сделать следующие выводы:

- типовые технологические процессы не позволяют создавать прецизионные RC- элементы и микросхемы в целом с широким диапазоном номинальных значений элементов;

- емкостные элементы характеризуются низкой точностью, малым значением рабочего напряжения и высоким значением $tg \delta$.

С другой стороны, потребности развития техники широкого функционального назначения диктуют необходимость создания микросхем с высокими эксплуатационными и точностными характеристиками, которые могут быть реализованы путем повышения удельных характеристик пассивных элементов и идентичности их параметров на основе применения новых технологических приемов и материалов.

1.4. Специфика космических РЭС

Запуск и полет космических аппаратов (КА) и их функционирование обеспечиваются комплексом бортовых радиоэлектронных средств служебного назначения, в который входят средства ориентации и стабилизации положения КА в пространстве, средства навигации при межпланетных перелетах и выполнении маневров на орбите, радиолокационные и лазерные средства наведения для решения задач обложения и стыковки КА и осуществления посадки

космических аппаратов на поверхность планет, командно-телеметрические системы, линии радиосвязи и пр.

Основная особенность условий, в которых работают КА, а также космонавты, пилотирующие космические корабли, заключается в отсутствии силы тяжести и в быстрой смене ориентиров при полете на орбите. Ориентация КА в пространстве и поддержание их в ориентированном состоянии, т.е. стабилизация их положения, осуществляются по сигналам многочисленных датчиков направления, использующих самые различные принципы определения направления. Сигналы датчиков направления преобразуются бортовыми вычислительными устройствами в управляющие сигналы, задающие режимы работы исполнительным устройствам системы ориентации и стабилизации. Диапазон сложности применяемых в космических целях бортовых вычислительных устройств огромен: от простейших аналоговых специализированных машин, решающих частные задачи, до универсальных цифровых вычислительных машин, решающих весь комплекс задач управления космическим аппаратом на всех этапах его полета.

На всех этапах запуска КА работа радиоэлектронной аппаратуры имеет огромное значение. Наблюдение за космическими аппаратами, их обнаружение и сопровождение осуществляется мощными радиолокационными станциями и радиотелескопами. Обработка результатов наблюдений, вычисление элементов траектории КА, прогнозирование их координат и времени появления в зоне видимости наземных наблюдательных станций, определение необходимых параметров работы двигательных установок КА для их ориентации, стабилизации положения или изменения траектории - все эти операции проводятся электронными вычислительными комплексами.

Сами КА являются носителями большого количества разнообразной радиоэлектронной аппаратуры. Средствами радиоэлектроники производятся многочисленные эксперименты в космосе, результаты которых передаются на Землю. Автоматические межпланетные станции позволяют обнаруживать новые явления, с которыми встретятся исследователи межпланетного пространства и планет солнечной системы. Именно поэтому цель запуска многих спутников и космических кораблей заключается в выведении в космическое пространство электронной аппаратуры, предназначенной для изучения свойств космического пространства и планет, для наблюдения и контроля условий работы элементов конструкций и различных узлов космических аппаратов в полете. Средствами радиоэлектроники создаются условия для нормальной жизнедеятельности космонавтов, осуществляются наблюдение за ними и их связь с Землей. Радиоэлектронные средства обеспечивают нормальное функционирование космических аппаратов на

орбите, должную их ориентацию, стабилизацию положения КА в пространстве, решают задачи навигации. Каждый космический аппарат оснащен телеметрической аппаратурой, предназначенной для сбора, преобразования и передачи на Землю научных данных и сведений о работе узлов КА.

Линия связи используется также для передачи с наземных станций управления на борт спутника команд на включение и выключение различных систем, изменение режима работы аппаратуры, управление полетом и т.д.

Можно выделить следующие основные типы КА, которые отражают соответствующие направления развития космических программ:

- 1) космические аппараты народнохозяйственного назначения;
- 2) КА для исследования околоземного и околосолнечного пространства;
- 3) пилотируемые космические корабли;
- 4) международные космические станции;
- 5) КА специального назначения.

По мнению академика Уткина В.Ф. [4] сложившиеся современные направления космической деятельности сохранятся и в начале нового XXI века, но наряду с традиционными будут использоваться новейшие достижения науки и техники, которые все в большей степени будут базироваться на новых прогрессивных решениях, таких как:

- 1) оптимальное сочетание модульной конструкции КА с их универсализацией и унификацией;
- 2) создание экономически высокоэффективных многоразовых средств выведения и межорбитальной транспортировки;
- 3) удешевление стоимости проектных разработок, выведение и эксплуатация путем разработок и создания малых КА на основе микроминиатюризации бортовых средств радиоэлектроники, ЭВМ и оборудования;
- 4) роботизация космических технологий путем разработки систем искусственного интеллекта;
- 5) разработка и создание мобильных и оперативных ракетно-космических средств геоинформационного обеспечения экологического контроля Земли и околоземного пространства и др.

В настоящее время особую актуальность в проблеме обеспечения эффективной эксплуатации изделий приобрели вопросы, связанные не только со «случайными» отказами элементов систем и аппаратуры КА, но и с системной устойчивостью функционирования в динамичных условиях комплексного и длительного воздействия космической среды. При этом, такой учет влияния космической «погоды» при длительной эксплуатации космических систем, как комплексного фактора, сказывающегося существенное влияние на целевую

эффективность, выдвигает новую важную научно-практическую проблему, которая формирует задачи нового этапа для специальных исследований.

Проблема обеспечения устойчивости функционирования КА при длительных космических полетах включает в себя несколько традиционных вопросов частного и общего характера. Так, к числу частных относятся задачи обеспечения надежности элементной базы и стойкости элементов к длительному воздействию внешних факторов и эксплуатационных нагрузок. А к общим вопросам относятся задачи системного характера – защитные меры, принимаемые при конструировании КА для снижения уровня воздействий факторов эксплуатационных нагрузок, и оперативная адаптация характеристик систем и приборного оснащения КА для повышения их устойчивости к динамике изменений внешних факторов и нагрузок в условиях длительного космического полета.

2. КАЧЕСТВО МИКРОСБОРОК И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

2.1. Особенности создания специализированной МЭА

Одной из основных тенденций развития микроэлектроники является повышение степени интеграции и функциональной плотности МЭА. С ростом уровня интеграции изделий микроэлектроники неизменно достигается снижение стоимости, улучшение показателей надежности, отнесенных к единичной функции, уменьшение массы и габаритов изделий [5]. Технический и экономический эффект, получаемый при практической реализации указанной тенденции, обеспечивает ее стабильность и долговременный характер. Отмеченные закономерности обусловлены спецификой условий групповых методов обработки, применяемых при изготовлении микроэлектронных изделий [6].

Однако с увеличением степени интеграции и функциональной сложности компонентов (МСБ, ИМС), изготавливаемых по процессам интегральной технологии, возникает необходимость совершенствования разработки и производства МЭА. По мере реализации основной тенденции микроэлектроники становится труднее получить наибольший эффект при существующем разделении труда между разработчиками и изготовителями элементной базы, с одной стороны, и разработчиками и изготовителями МЭА – с другой. Рост интеграции и функциональной сложности компонентов, относящихся к элементной базе, приблизил эти

изделия по своим характеристикам к устройствам более высоких структурных уровней. Поэтому изготовители элементной базы (традиционных изделий электронной техники) стремятся и имеют возможность поставлять продукцию в виде функционально законченных устройств [7].

Объективно рост интеграции изделий электронной техники неизбежно способствует формированию у этих изделий узкоспециализированных свойств. Одновременно с ростом интеграции изделия электронной техники лишаются свойств типовых элементов широкого применения. Поэтому разработчиков электронной аппаратуры не всегда удовлетворяют функциональные возможности серийно выпускаемых ИМС высокого уровня интеграции, так как эти ИМС разработаны без учета особенностей конкретной аппаратуры. Последнее обстоятельство определило стремление разработчиков и изготовителей аппаратуры к созданию собственной элементной базы, предназначенной для конкретных изделий МЭА. Это позволяет разработчикам МЭА конструировать и изготавливать элементную базу, наиболее полно обеспечивающую выполнение целевой задачи, возлагаемой на разрабатываемую систему.

В нашей стране процесс объединения разработчиков аппаратуры и элементной базы узкого применения нашел отражение в разработке и реализации метода комплексной микроминиатюризации, положенного в основу конструирования МЭА [8].

Стремление к объединению усилий разработчиков аппаратуры и элементной базы является следствием развития основной тенденции микроэлектроники. Этот процесс называют процессом «вертикальной интеграции».

Осуществление метода комплексной микроминиатюризации определило комплексный подход к формированию структуры организации (объединения), разрабатывающей и выпускающей МЭА, т.е. к созданию взаимодействующих подразделений, решающих задачи всех уровней разработчиков аппаратуры, схемотехников, системотехников, конструкторов, разработчиков технологии, производственных подразделений.

В рассматриваемой организационной структуре устраняются причины сдерживания темпов развития РЭА, заключающиеся в различии чек зрения на общую систему контроля качества и надежности у разработчиков аппаратуры и разработчиков изделий электронной техники (ЭТ). Первые стремятся перенести тяжесть требований по качеству и надежности на изделия ЭТ, вторые, создавая более сложные изделия, не могут в связи с отсутствием опыта обеспечить заданные параметры надежности изделий, изготавливаемых в производстве.

Одним из основных принципов комплексной микроминиатюризации является принцип комплексного анализа, оптимизации и синтеза,

который состоит в параллельности, одновременном ведении всей разработки, включая подготовку опытного производства. Осуществление этого принципа позволило, начиная разработку, ориентироваться на уровень, опережающий существующие мировые стандарты. Это достигается сокращением сроков выполнения работ за счет совмещения по времени этапов разработки электрической схемы, конструкции и технологии. Изготовление опытного образца идет одновременно с внедрением в опытное производство технологических процессов. Последнее становится и экономически оправданным благодаря переходу на проектирование, основанное на прогнозировании показателей качества, надежности, стоимости в зависимости от конструктивных особенностей, уровня технологии и требований к аппаратуре [9].

В производстве элементной базы узкого применения появляются дополнительные возможности оптимизировать конструкцию и технологию по результатам изготовления технологических компонентов аппаратуры. «Собственное» производство обеспечивает большие возможности проведения оперативных работ по устранению выявившихся недостатков изделий более высоких структурных уровней. В рассматриваемом производстве появляются более широкие возможности оптимизации процессов контроля и технологических испытаний.

Таким образом, для правильного понимания проблем обеспечения качества необходимо исходить из требований к росту уровня интеграции ИМС и МСБ, их функциональной сложности и действия генденции к «вертикальной интеграции».

Следует понимать, что в развитии того или иного направления науки и техники неизбежно наступает момент несоответствия необходимого и возможного. Современный этап развития микроэлектроники характеризуется переходом к конструированию сверхбольших ИМС и МСБ и расширением области применения принципов комплексной микроминиатюризации при создании новых изделий МЭА. Прогресс в указанных направлениях возможен при условии разрешения ряда проблем в областях технологии, материаловедения и обеспечения качества компонентов МЭА.

2.2. Проблемы обеспечения качества микросборок

В области обеспечения качества следует выделить проблемы эффективности управления технологическим процессом (ТП), эффективности использования автоматизированных систем для контроля компонентов МЭА, раннего выявления и реализации резервов качества МЭА (рисунок 2).

Тенденции

К росту интеграции и функциональной сложности

К интеграции разработчиков аппаратуры и элементной базы ("вертикальная интеграция")

Следствия

Параллельное ведение разработки ЭА и применяемых в ней компонентов

Рост числа факторов, определяющих качество изделия

Рост номенклатуры и снижение тиражности изделий

Раннего выявления и реализации резервов качества

Проблемы

Эффективности управления ПП

Эффективности использования автоматизированных систем для контроля изделий

Рис.2. Проблемы обеспечения качества микросборок (МЭА)

Проблема эффективности управления ПП связана с увеличением числа факторов, определяющих уровень качества изделий высокой степени интеграции. Каждый новый конструктивно-технологический вариант изделия высокой интеграции в общем случае сложнее предыдущего (например, с ростом уровня интеграции полупроводниковых ИМС в их конструкции появились двух-, а затем и трехуровневая коммутационная разводка). По мере усложнения конструкции изделий усложняется и технология их изготовления, растет число операций ПП.

При уменьшении геометрических размеров элементов возрастает влияние на их функциональные параметры дефектов и несовершенств физической структуры изделия, процессов диффузии и химического взаимодействия, происходящих на границе раздела различных сред.

С уменьшением геометрических размеров элементов изделий микроэлектроники и увеличении их числа возрастает вероятность повреждения изделия различного рода дефектами, возникающими как следствие физической природы применяемых материалов, влияния технологических режимов обработки и влияния технологических сред [10,11].

Таким образом, с ростом степени интеграции усиливается влияние целого ряда факторов на функциональные характеристики элементов, на поведение этих характеристик в условиях эксплуатации, на повреждаемость изготавливаемых изделий. С ростом числа факторов существенно усложняется процесс установления связей, необходимых для управления ТП изготовления изделий микроэлектроники. Так, возросла сложность установления связей интегральных характеристик качества ТП (величины технологических потерь и числа потенциально ненадежных изделий) с различного рода параметрами операций ТП. Последнее обусловлено существенным влиянием на измеряемые параметры конструктивных различий топологического рисунка изделий, изготавливаемых по одному конструктивно-технологическому варианту (КТВ), т.е. широкой номенклатурой производства. На практике установлено, что, как правило, каждый тип изделия характеризуется присущим этому изделию коэффициентом выхода годных изделий. Для управления операциями ТП можно было бы использовать сведения, полученные при операционном контроле. Однако информативные методы контроля (например, контроль рельефа поверхности) при помощи стереосканирующего микроскопа или контроль геометрических размеров (при помощи оптических микроскопов) трудоемки и не позволяют получить статистически значимые характеристики. Часть простых методов операционного контроля: контроль внешнего вида, удельного сопротивления образцов, находящихся у исполнителей контролируемых операций в условиях производства, нельзя признать полностью объективными. Кроме того, число таких методов недостаточно

без информации, позволяющей оправдать вклад каждой операции в формирование конечного уровня качества изделия, обеспечить эффективное управление ТП невозможно. Можно прогнозировать дальнейший рост числа факторов, влияющих на качество при дальнейшем увеличении уровня интеграции изделий. Следовательно, несоответствие требуемого и возможного в управлении ТП также будет возрастать [7].

По мере роста степени интеграции все более четко обозначается проблема эффективности контроля компонентов МЭА. Высокий уровень автоматизации ИМС и МСБ, применение групповых методов обработки обуславливают малое время технологического цикла изготовления ИМС. В то же время все существующие методы контроля индивидуальны, т.к. объем измерений и схема зависят от типа контролируемых ИМС. Это приводит к увеличению доли контрольно-измерительных операций в общей трудоемкости изготовления ИМС и выдвигает в число наиболее актуальных задач разработку высокопроизводительных методов контроля [12].

Одним из методов контроля ИМС является сплошной поэлементный контроль, основанный на полной проверке параметров всех элементов ИМС и особенно широко применяемый в производстве плат ГИМС [13].

Трудоемкость контроля плат ГИМС данным методом при ручном способе измерения параметров элементов составляет до 50% от общей трудоемкости изготовления ГИМС. Попытки снижения этой трудоемкости путем использования автоматизированных систем с групповым присоединением к элементам платы не дают ожидаемого результата.

Другим известным методом контроля является автоматизированный контроль ИМС на функционирование, нашедший широкое применение в отечественной и зарубежной практике для проверки полупроводниковых микросхем. Контроль в этом случае проводится на автоматических тестерах или автоматизированных измерительных системах (АИС), содержащих микропроцессоры и управляющие ЭВМ. В отечественной практике для такого контроля выпускаются, в частности, система «Вахта», «Интеграл», «Эликон-СД», «Вишня», «Визир» и др. [14].

Для пассивных ИМС до проведения сборки функционального узла проверка схем на функционирование вообще невозможна.

Проблема раннего выявления и реализации резервов качества возникает вследствие параллельного ведения разработки МЭА и используемых в этой аппаратуре изделий микроэлектроники, а также из-за снижения норм и объемов испытаний некоторых изделий микроэлектроники, аттестуемых по качеству и надежности в составе изделий более высокого структурного уровня.

При параллельном ведении работ по созданию электрической схемы и конструкции МЭА, а также по разработке конструкции и технологии изготовления, применяемых в МЭА изделий микроэлектроники, объективно возникают условия, повышающие вероятность возникновения их отказов. Известно, что интенсивность отказов компонентов электронной аппаратуры зависит от этапа их освоения в производстве (рисунок 3). Наиболее высокой интенсивностью отказов характеризуются изделия, не прошедшие этапа опытного производства,

более низкой – изделия, изготавливаемые в серийном производстве [15]. При параллельном ведении разработок МЭА и применяемой в ней элементной базы последняя поступает, как правило, с начального этапа опытного производства. В этом случае существует проблема раннего выявления резервов качества. Эта проблема определяет необходимость разработки таких методов выявления резервов повышения качества изделий, применение которых было бы эквивалентным полному прохождению изделиями этапа опытного производства.

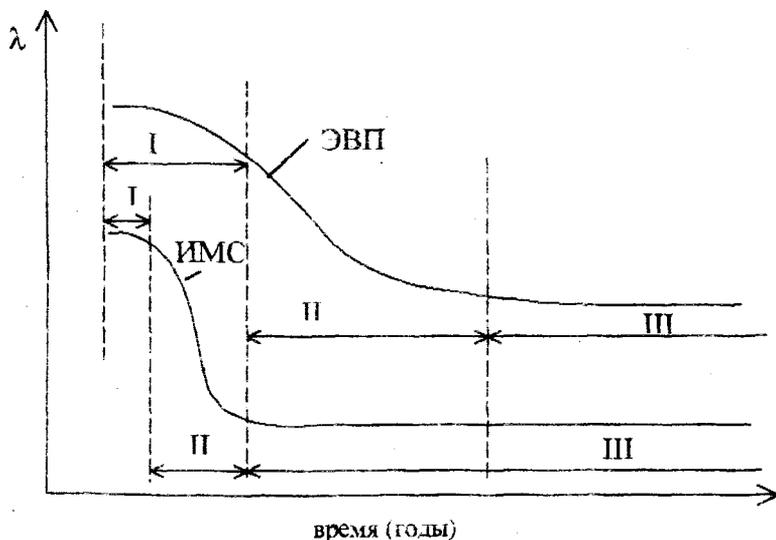


Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов ЭВП от этапов их освоения в производстве

Параллельное ведение работ по разработке конструкции и технологии изготовления «собственных» компонентов (в условиях «вертикальной интеграции») нарушило установившийся алгоритм выявления резервов качества путем многочисленных испытаний, предусмотренных нормами технических условий на компоненты МЭА (имеются в виду пленочные компоненты). Альтернативный вариант – выявление резервов на испытаниях изделий, в составе которых находятся «собственные» компоненты, не является равноценным предыдущему по своей эффективности. Можно констатировать существенное уменьшение объема испытаний и снижение норм воздействия эксплуатационных факторов на компоненты «собственного» изготовления

Такие факторы, как рост функциональной сложности, изменение организации разработки систем МЭА и применяемых в системах компонентов, определили следующее два условия перспективности направлений работ по решению проблем качества. Первое условие – необходимость комплексного системного подхода к обеспечению качества, второе – использование преимущественно автоматизированных систем для получения и переработки информации о качестве [7].

Проектирование изделий без учета объективных показателей уровня качества методов и средств технологии приводит к такому снижению выхода годных изделий (показателей надежности), при котором их производство нерентабельно. Для выявления наиболее критичных операций и обеспечения выбора обоснованных решений по совершенствованию ТП необходима информация о параметрах элементов физической структуры изделий микроэлектроники (рисунок 4).



Рис.4. Методы для решения проблем обеспечения качества МЭА

Качество изделий микроэлектроники обеспечивается как выбором методов и технологических средств их осуществления, так и настройкой операций ТП, реализуемых при помощи выбранных методов и оборудования. Для управления операциями сложного ТП необходима информация о временном изменении параметров элементов физической структуры, формируемых на каждой операции или группе операций.

Оценку качества изделий микроэлектроники осуществляют по функциональным параметрам. Анализ этих параметров не позволяет сделать заключение об уровне качества отдельных операций и применяемых для их реализации технических средств. В то же время параметры дают наиболее полную информацию о состоянии операций ТП. Поэтому перспективно заменить контроль продукции по функциональным параметрам на контроль по параметрам элементов физической структуры. Поскольку функциональные параметры и параметры элементов физической структуры взаимосвязаны, то принципиальная возможность такой замены существует. Информация о параметрах элементов физической структуры может быть использована для решения задач контроля компонентов МЭА.

Поэтому из всевозможных направлений работ по решению проблем обеспечения качества микросборок можно выделить следующие:

- разработка методов и систем оптимизации конструктивно-технологических решений на ранних этапах разработки изделия;
- разработка автоматизированных систем контроля, анализа и управления качеством ТП и изготавливаемой по этому процессу продукции.

Успешное решение задач по указанным направлениям может быть обеспечено применением такого универсального инструмента получения информации о качестве изделия и процесса его изготовления каким является тестовая структура (схема).

2.3 Определение и показатели качества

Понятие «качество» в промышленности используется давно, однако до сих пор не выработан единый подход к его определению. Это объясняется тем, что многие изделия, в частности ИМС, характеризуются большим количеством показателей, которые могут быть использованы в качестве критериев качества. Такими показателями являются значения электрических параметров, потребляемая мощность, процент выхода годных ИМС, габариты, масса, стоимость, надежность и др. Поскольку эти показатели определяются совокупностью схемотехнических, конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, а

требования к ним в большинстве случаев являются противоречивыми, количественная оценка качества ИМС по данным показателям затруднена [16]. Задача усложняется и тем, что требуется комплексная оценка качества ИМС.

Наиболее целесообразной является теория «относительного качества», сущность которой состоит в том, что качество продукции определяется ее целевым назначением. Качеством продукции, в том числе ИМС и МСБ, называют совокупность свойств продукции, обуславливающих ее способность удовлетворить определенные потребности в соответствии с назначением. При этом качество определяется как степень совершенства продукции, которая фиксируется требованиями, учитывающими запросы потребителя и возможности производства.

В этом случае понятие качества продукции ставят в зависимость от этапов ее создания:

на этапе проектирования – соответствие техническому заданию (ТЗ);

на этапе производства – соответствие требованиям технической документации (ТД);

на этапе применения – степень удовлетворения потребителя.

Такой подход позволяет поставить задачу количественной оценки качества. Его применение для оценки качества ИМС требует разработки стройной системы показателей качества, в первую очередь обобщенных (комплексных) показателей качества.

Существует ряд методов оценки качества ИМС единым комплексным показателем, например коэффициентом качества. За высшую оценку условно принимают коэффициент качества, равный единице. Он складывается из процента сдачи продукции с первого предъявления, претензий потребителя, величины брака, состояния технологической дисциплины и др. При ухудшении любого из показателей коэффициент качества снижается. В ряде случаев основным критерием качества служит наличие рекламаций на готовые изделия. Иногда уровень качества изделий определяют по результатам сравнения количественных показателей качества рассматриваемого изделия с показателями действующего стандарта.

Наиболее эффективной является количественная оценка качества ИМС комплексным показателем Q , вычисляемым по формуле:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^n m_i q_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (1)$$

где m_i – весовые коэффициенты каждой группы; q_i – групповые показатели качества; n – число групп свойств.

Согласно методике оценки уровня качества изделий электронной техники имеется восемь групп свойств и соответственно восемь

групповых показателей качества: по назначению, надежности, стандартизации и унификации, технологичности, экономичности, эргономичности и эстетичности, а также патентно-правовые.

Каждая из этих групп описывается совокупностью технико-экономических показателей, количество которых определяется конструктивно-технологическим исполнением ИМС и областью их применения. Тем не менее, из всей совокупности групповых показателей качества можно выделить обобщенные, которые характеризуют определяющее значение уровня качества ИМС. Это отношение прежде всего к показателям качества по назначению, технологичности и надежности. Так, для цифровых ИМС показателем качества по назначению часто служит коэффициент:

$$F = P t_{\text{з.ср.}} \quad (2)$$

где P – удельная мощность, потребляемая одним элементом или ИМС, мВт; $t_{\text{з.ср.}}$ – среднее время задержки на один элемент или ИМС, нс.

По значению данного показателя производят не только оценку уровня качества однотипных или разнотипных ИМС, но и их сравнение с целью выбора элементной базы для практического применения.

При повышении степени интеграции помимо необходимости улучшения коэффициента качества важнейшей задачей является уменьшение площади, занимаемой ИМС и приходящейся на элементарный вентиль цифровой ИМС или на одно преобразование информации. В этом случае (для цифровых ИМС) наиболее целесообразно использование обобщенного коэффициента, учитывающего конструктивно-технологическое совершенство ИМС:

$$K = \frac{n^{\circ}}{P t_{\text{з.ср.}}} \quad (3)$$

где n° – количество элементарных вентилю, приходящихся на 1 мм² площади кристалла (интегральная плотность).

В таблице 2 приведены значения коэффициентов показателей качества по назначению для основных классов ИМС.

Аналогичные показатели качества по назначению можно применять и для аналоговых ИМС:

$$K = n^{\circ} Q \quad (4)$$

где Q – добротность усилительного каскада.

Среди показателей качества по технологичности важное место отводится проценту выхода годных ИМС. Это объясняется тем, что выход годных изделий определяет в комплексе не только уровень и стабильность производства ИМС, но и их стоимость, а также тем, что

стабильность производства ИМС, но и их стоимость, а также тем, что между процентом выхода годных изделий и показателями надежности ИМС существует связь.

Таблица 2

Значения коэффициентов показателей качества по назначению для различных типов цифровых ИМС

Тип логики	Потребляемая мощность на вентиль P, мВт	Задержка переключения на вентиль $t_{ср}$, нс	Показатель качества по назначению, F	Интенсивная плотность п ⁰ , вентиль/мм ²	Число элементов в вентиле на два входа	Обобщенный коэффициент качества K
ТТЛ	10	10	100	15	9-12	0,15
ТТЛШ	20	3	60	15	14	0,25
ЭСЛ	25-50	0,5-2	50-25	15	10-12	0,3-0,6
И ² Л	50 мкВт	10	0,5	100	3-4	200
n-МДП	0,1-1,0	1-10	1,0	150	3	150
КМДП	50 нВт (статическая), зависит от частоты	10-50	Зависит от частоты	70	4	Зависит от частоты

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГИБРИДНЫХ МИКРОСХЕМ И МИКРОСБОРОК

3.1. Технологические маршруты производства тонкопленочных ИМС

Совокупность технологических операций, составляющих технологический маршрут производства тонкопленочных ИМС, включает в себя подготовку поверхности подложки, нанесение пленок на подложку и формирование конфигурации тонкопленочных элементов, монтаж и сборку навесных компонентов, защиту и герметизацию ИМС

от внешних воздействий. Важное значение при создании ГИМС имеют контрольные операции, а также подготовка производства: изготовление комплекта масок и фотошаблонов, приобретение (изготовление) и входной контроль компонентов ГИМС и исходных материалов [4].

При этом в соответствии с ГОСТ 17021-75 под компонентом ИМС понимают часть интегральной микросхемы, реализующую функции какого либо электрорадиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Упрощенная схема ТП изготовления тонкопленочной ГИМС представлена на рисунке 5.

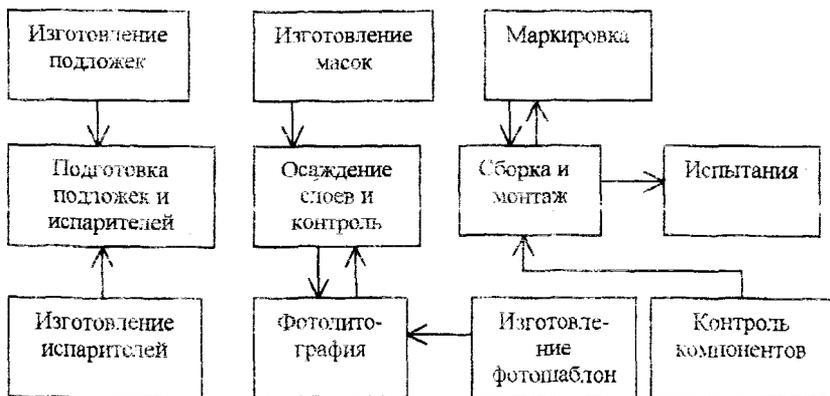


Рис.5. Упрощенная схема ТП изготовления тонкопленочной гибридной схемы

Нанесение пленок на подложку осуществляется

А) термическим испарением материалов в вакууме с конденсацией паров этих материалов на поверхности подложки;

Б) ионным распылением мишеней из наносимых материалов с переносом атомов мишеней на поверхность подложки;

В) химическим осаждением пленок в результате протекания химических реакций в газовой фазе над поверхностью подложки с образованием пленкообразующего вещества с последующим его осаждением на подложку

Для формирования конфигураций проводящего резистивного и диэлектрического слоев используют различные методы: масляный (соответствующие материалы напыляют на подложку через съемные маски), фотолитографический (пленку наносят на всю поверхность

подложки, после чего выравливают с определенных участков); электронно-лучевой (некоторые участки пленки удаляют по заданной программе с подложки путем испарения под воздействием электронного луча); лазерный (аналогичен электронно-лучевому, только вместо электронного применяют луч лазера). Наибольшее распространение получили два первых способа, а также их сочетания.

Самым простым методом получения заданной конфигурации пленочных элементов является масочный, при котором нанесение каждого слоя тонкопленочной структуры осуществляется через специальный трафарет (съёмную маску), с определенной точностью повторяющий геометрию проводящих, резистивных или диэлектрических элементов ИМС. При масочном методе рекомендуется такая последовательность формирования слоев ГИМС: напыление: резисторов; проводников и контактных площадок; межслойной изоляции; второго слоя для пересечений проводников; нижних обкладок конденсаторов; диэлектрика; верхних обкладок конденсаторов; защитного слоя.

При масочном методе операции нанесения пленки и формирования конфигураций элементов выполняются одновременно. Масочный метод является самым простым, технологичным и высокопроизводительным.

Метод фотолитографии позволяет получить конфигурацию элементов любой сложности и имеет большую точность по сравнению с масочным, однако он более сложен, так как включает ряд прецизионных операций. При использовании фотолитографии процессы нанесения пленок и формирования конфигураций пленочных элементов во времени разделены.

Существует несколько разновидностей метода фотолитографии. Метод прямой фотолитографии предусматривает следующую последовательность формирования пленочных элементов: нанесение сплошной пленки материала тонкопленочного элемента, формирование на ее поверхности фоторезистивной контактной маски, выравливание тишных участков пленки. Контактная маска из фоторезиста или другого материала более стойкого к последующим технологическим воздействиям, воспроизводит рисунок фотошаблона на пленке.

Метод обратной, или, как его иногда называют, взрывной фотолитографии отличается от предыдущего тем, что сначала на подложке формируется контактная маска, затем наносится материал пленочного элемента, после чего производится удаление контактной маски. При этом возможны два варианта нанесения пленки на контактную маску. Первый вариант – сначала пленка осаждается как на контактную маску, так и на свободные от нее участки подложки. Затем при быстром (взрывном) срывании контактной маски вместе с ней удаляются и участки пленки, расположенные поверх маски (селективное

травление). Метод реализуется при термовакуумном напылении, ионном распылении, осаждении из парогазовой смеси. Второй вариант – пленка осаждается только на свободные от маски участки подложки (селективное осаждение). Метод может использоваться при электролитическом осаждении электропроводящих материалов. Этот метод нельзя применять для создания многослойных конструкций ГИМС, т.к. для получения рисунка очередного слоя требуется обработка травителем и тщательная очистка подложки от химических реактивов, без чего невозможно добиться удовлетворительной адгезии при осаждении последующих слоев. Поэтому технологический процесс стараются построить так, чтобы нанести все слои микросхемы, а затем последовательным избирательным травлением получить их рисунок.

В ряде случаев целесообразно использовать комбинированный метод. Он совмещает масочный и фотолитографический методы.

Масочный метод применяют при мелкосерийном и серийном производстве. Точность изготовления R и C – элементов $\pm 10\%$. Фотолитографический метод используют в массовом производстве. Достижимая точность изготовления резисторов $\pm 1\%$. Комбинированный метод применяют при серийном производстве. Максимальная разрешающая способность при изготовлении пленочных элементов составляет 50 мкм, точность изготовления R- и C- элементов составляет ± 1 и $\pm 10\%$, соответственно. Максимальная точность изготовления резисторов (при подгонке) $\pm 1\%$, конденсаторов $\pm 5\%$.

В ряде случаев используют электронолитографию, голографию, ионные пучки [17]. Возможности методов формирования конфигурации тонкопленочных элементов приведены в таблице 3 [18].

Любой из рассмотренных технологических маршрутов производства ГИМС содержит сборочные операции: монтаж компонентов на плату, разварка или пайка их выводов, защита и герметизация.

Разрешающая способность методов создания

Метод	Теоретическое предельное разрешение метода, мкм	Принципиальное ограничение, определяющее предельное разрешение метода	Максимальное разрешение метода, мкм	Рабочая площадь, на которой обеспечивается разрешение метода, мм ²
1	2	3	4	5
Трафаретное маскирование	Определяется разрешением маски	Ограничения метода создания маски. Механическая прочность материала маски	12,5	2500
Контактная фото-литография. Обычный вариант	0,25 для света с $\lambda=0,4$ мкм	Дифракция света	1,25	2000
С зазором между фотоэблоннами и пластинами	2,0 для света с $\lambda=0,4$ мкм при зазоре 20 мкм. Зависит от размера зазора	Дифракция света	10	2000
Проекционная фото-литография	0,25 для света с $\lambda=0,4$ мкм	Дифракция света	0,4 3 1	0,04 2000 10

Таблица 3

конфигурации пленочных элементов

Основные преимущества метода	Основные недостатки метода	Минимальный размер воспроизводимой микроэлектронной структуры, получаемой на площади 2000 мм ² (диаметр 50 мм), мкм	Факторы, ограничивающие минимальный размер воспроизводимой микроэлектронной структуры	Основная область применения метода
6	7	8	9	10
Простота изготовления долговечных масок, возможность быстрой смены масок	Необходимость в комплекте масок	60	Разрешение метода, точность совмещения масок и рисунков на масках и пластине	Простые тонкопленочные электронные структуры с малой степенью интеграции. Кривоэлектроника
Высокое разрешение при сравнительно простой аппаратуре	Трудность совмещения и быстрое изнашивание фотошаблонов. Необходимость в комплекте фотошаблонов	2-3	Наличие зазора между фотошаблонами и между шаблоном и пластиной. Точность совмещения фотошаблонов и рисунков на фотошаблоне и пластине	Получение конфигурации ИС и микроэлектронных приборов
Практически не ограниченный срок службы фотошаблонов. Нет передачи мелких дефектов (до 4 мкм) с шаблона на пластину	Ухудшение разрешения	15-20	Разрешение метода	Стадия разработки

1	2	3	4	5
Голография	0.25 для света с $\lambda=0,4$ мкм	Дифракция света	1	100
Последовательная электронолитография:	Зависит от ускоряющего напряжения	Дифракция электронов	0.1	4
С управлением от фотокопира	Зависит от разрешения электронно-лучевой трубки	Ограничения по созданию высокоразрежающих электронно-лучевых трубок	5	2000
Проекционная электронолитография	Зависит от напряжения поля и энергии эмитированных фотокаатодом электронов	Дифракция электронов	0.2	2000
Термические электронные и лазерные пучки	Зависит от материала	Наличие тепловой зоны плавления и испарений	100 (для кремния) 30 (для алюминия)	2000 Практически любая (с координатным столом)
Ионные пучки	Зависит от диаметра полного пучка с током не менее 10^{-4} А	Малая яркость ионных источников	200	Практически любая (с координатным столом)

Таблица 3. Окончание

6	7	8	9	10
Высокое разрешение. Неограниченный срок службы шаблонов	Сложность изготовления высокоразрешающих объектов и трудность наводки на резкость	1.25	Точность перемещения координатных столов	Создание конфигурации элементов схем
Не нужны объективы	Жесткие требования к плоскостности фотошаблонов и их бездефектности	—	—	Стадия лабораторных исследований
Субмикронное разрешение. Не нужны шаблоны	Малая площадь сканирования. Низкая производительность	1	Точность перемещения координатных столов	Получение элементов с субмикронной геометрией
Дешевизна фотокопира	Нужны шаблоны. Низкое разрешение	5-10	Разрешение метода	Изготовление больших фотошаблонов
Высокая производительность	Необходимость в комплекте прецизионных шаблонов для фотокатодов		Точность совмещения рисунков на фотокатоде и пластине	Создание конфигурации элементов схем
Не нужны шаблоны при управлении от ЭВМ и резист	Большое число образующихся дефектов			Резка, скрайбирование, пайка и сварка, сверление
Не нужны шаблоны и резист. Разрешение определяется только диаметром пучка. Нет дефектов материала	Принципиальных технологических ограничений не имеет			Ионное травление и ионное внедрение (стадия разработки)

3.2. Технология производства толсто пленочных ИМС и плат микросборок

Технология производства гибридных толсто пленочных ИМС базируется на нанесении толстых (толщина более 1 мкм) слоев различных материалов, которые выполняют роль проводников, резисторов и диэлектриков в соответствующих конструктивных элементах ИМС. Для того чтобы создать заданный рисунок ИМС, используются методы трафаретной печати, сущность которых заключается в следующем. Паста определенного состава и вязкости продавливается с помощью ракеля через сетчатый трафарет, образовавшийся слой проходит затем дополнительную обработку (сушку, обжиг, вжигание) для закрепления материала на плате и придания ему заданных электрофизических и механических свойств [19].

На рисунке 6 приведена упрощенная схема технологического процесса изготовления толсто пленочных микросхем.



Рис.6. Схема технологического процесса изготовления толсто пленочных микросхем

При нанесении паст на поверхность подложки методом трафаретной печати важным является знание их реологических свойств [20]. Реологические исследования паст и исходных материалов позволяют классифицировать пасты по их реологическим характеристикам, получать органические связующие с заданными свойствами, управлять технологическим процессом приготовления паст и их нанесения.

Пасты относятся к категории неьютоновских жидкостей, в которых вязкость изменяется при заданных температуре и давлении и зависит от скорости деформации сдвига, конструктивных особенностей

устройств для их нанесения и предыстории жидкости. Они обладают большой вязкостью (порядка 500 П и выше), имеют сложные реологические характеристики, обнаруживают псевдопластический характер течения, ведут себя подобно пластичным жидкостям, проявляя иногда чисто ньютоновский характер течения, обладают тиксотропией.

При трафаретной печати необходимо выявление связи реологии паст с такими переменными характеристиками процесса, как скорость ракеля, размер окон трафарета и требуемое разрешение линий. С точки зрения реологических свойств идеальной пастой является та, которая удовлетворяет следующим требованиям. Паста должна катиться перед ракелем (не срезаться) при его обратно-поступательном движении; если паста начинает срезаться, она не может соответствующим образом заполнить полости сетки и получится плохой отпечаток; хорошо смачивать подложку; иметь оптимальную вязкость, чтобы, с одной стороны, легко проходить через трафарет и не оставлять на поверхности пленки следов сетки, а с другой – чтобы после печати иметь минимальное растекание рисунка толсто пленочной схемы.

Для получения рисунка толсто пленочных микросхем в основном применяют сетчатые и фольговые трафареты. Фольговый трафарет представляет собой металлическую фольгу из одного или двух металлов толщиной, равной заданной толщине слоя пасты и закрепленной на жесткой рамке. Сетчатый трафарет состоит из сетки (стальной, капроновой, нейлоновой, шелковой или др.), равномерно натянутой на раме. Трафарет не только обеспечивает конфигурацию рисунка, но и помогает дозировать пасту, поступающую на подложку.

Трафареты изготавливают методом фотолитографии. При этом на сетку или фольгу наносят центрифугированием, пульверизацией или поливом слой фоторезиста. Высушенный слой фоторезиста подвергают экспонированию через фотошаблон, представляющий собой прозрачную пластину (пленку) с негативным или позитивным изображением рисунка. После экспонирования слой фоторезиста удаляют (в холодной плазме или промывкой) растворением незаэкспонированных мест. Оставшийся слой требует упрочнения (задубливания) для повышенной износостойкости (сетчатый трафарет) или увеличения химической стойкости (фольговый трафарет). Задубливание осуществляется термообработкой фоторезиста при температуре свыше 100 °С.

Характеристики сеток трафарета из различных материалов по данным [20] приведены в таблице 4.

Подложки для толсто пленочных гибридных микросхем должны обладать хорошим теплопроводом. Наибольшее распространение получили подложки на основе высокоглиноземистой керамики. Иногда используют бериллиевую керамику и электрокорунд.

При изготовлении подложек для толсто пленочной технологии необходимо учитывать возможность изменения химического состава материала подложек. Прочная связь пленок с керамической подложкой не должна ухудшаться. Для толсто пленочных микросхем применяются подложки с менее гладкими поверхностями. Это объясняется тем, что при более шероховатой поверхности адгезия толстой пленки к керамике получается лучше.

Основные характеристики керамических подложек приведены в таблице 5.

Обязательным условием получения качественных слоев является очистка подложки перед нанесением паст. Методы очистки определяются видами загрязнений [21]. Основным методом очистки является химическая очистка. Иногда используют очистку в ультразвуковой ванне с растворителем. При очистке должны быть разрушены адсорбционные связи между подложкой и загрязнениями без нарушения поверхности самой подложки.

Требуемые физические и электрические свойства толстых пленок получают в результате физикохимических реакций, протекающих в процессе термообработки (вжигания), которая проводится в два этапа. Первый этап — низкотемпературная сушка, второй — высокотемпературный обжиг, называемый вжиганием [22].

Сушку осуществляют при невысокой температуре (100-150 °С); время сушки зависит от вида пасты и составляет 5...15 минут. В процессе сушки из паст удаляют органические добавки. Вжигание — это физикохимический процесс, в результате которого дисперсная подвижная система (паста) превращается в механически прочное плотное тело.

Таблица 4

Характеристика сеток с мелким переплетением

Число отверстий/ материал	Диаметр нити, мкм	Размер ячеек, мкм	Толщина сетки, мкм	Открытая область, %
1	2	3	4	5
280/СС	30	61	76	45
280-С/Н	33	58	51	45
280-Н/Д/Д	41	46	66	25
280-Т/МП	37	54	55...65	32
300/СС	32	56	71	41
306-С/Н	30	53	44	41
305-Т/Д	33	51	57...65	37

Таблица 4. Окончание

1	2	3	4	5
325/СС	28	51	71	42
330-С/Н	30	46	47	37
330-Т/Д	33	43	61..62	31
330-Т/МП	38	31	-	23
400/СС	25	38	56	36
380-С/Н	30	35	48	30
390/Д	33	32	55	24
390-Т/МП	38	31	-	23

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

Таблица 5

Керамические подложки из оксидов алюминия и бериллия

Характеристика	Al ₂ O ₃ 96%	Al ₂ O ₃ 99.5%	BeO 99.5%	
1	2	3	4	
Шероховатость поверхности, мкм	0,63	0,20	0,45	
Влагопоглощение, %	0	0	0	
Плотность, г/см ³	3,70	3,89	2,88	
Твердость по Роквеллу	78,0	80,0	65,0	
КЛР*10 ⁻⁸ °С ⁻¹ , при:				
	25...300 °С	6,4	6,0	6,0
	25...700 °С	7,5	7,5	7,8
25...900 °С	7,9	8,3	8,5	
Коэффициент теплопроводности, Вт/м °С, при:			230	
	25 °С	35,0	36,7	117
	300 °С	17,0	17,5	71
	500 °С	10,8	11,0	33
	800 °С	8,4	8,5	

Таблица 5. Окончание

1	2	3	4
Прочность на изгиб * 10 ³ , кгс/см ²	3,1	3,75	1,75
Пробивное напряжение Uпр*10 ⁷ , В/м, при толщине:			
0,25 мм	2,76	2,76	2,0
0,63 мм	2,16	2,16	2,0
0,76 мм	2,0	2,0	2,0
Относительная диэлектрическая проницаемость	9,1	9,6	6,4
Тангенст угла диэлектрических потерь (25°C, 1 МГц)	0,0027	0,0019	0,0016
Удельное объемное электрическое сопротивление - ρ 10 ¹² , Ом*м, при:			
25 °С	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁴
100 °С	2*10 ³	10 ⁴	10 ⁴
300 °С	1,1	10 ⁴	10 ⁴

Физикохимические превращения сопровождаются уменьшением суммарной поверхности за счет взаимного контактирования частиц пасты, то есть 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 таблице 6 даны виды физических превращений и химических реакций, происходящих в пастах при вжигании [22].

Подгонку элементов ИМС производят лазерным, пескоструйным, механическим или другими методами [23].

Монтаж компонентов на подложку производят методом эвтектической пайки, пайки мягким припоем или с помощью токопроводящих клеев. Выбор метода определяется условиями эксплуатации компонента.

Пайка обеспечивает хорошую электропроводность соединения. Наиболее часто используется приклейка компонента с помощью компаундов.

Введя в компаунд наполнители, можно в широких пределах менять электро- и теплопроводность клеевого соединения. Все методы монтажа

должны обеспечить механически прочное соединение навесного компонента с подложкой.

Выводы навесных компонентов выполняются из мягких и пластичных металлов — золота и алюминия. Они присоединяются к предварительно облуженным контактным площадкам подложки сваркой (термокомпрессионной, ультразвуковой) или пайкой.

Монтаж навесных компонентов с жесткими выводами (например, шариковыми) проводится с помощью лудящих паст. Паста наносится через трафарет с увеличенным размером ячеек сетки (до 200 мкм), позволяющий нанести большое количество пасты на малые площадки подложки.

Дискретные конденсаторы, которые имеют облуженные контактные площадки, монтируются с помощью пайки.

После монтажа при необходимости может быть проведена функциональная подгонка.

Таблица 6

Тип пасты	Виды взаимодействия		
	Между компонентами пасты	Между компонентами пасты и материалом подложки	Между компонентами пасты и атмосферой
Проводящая	Спекание и образование сплавов 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 $PdO \rightarrow Pd + 1/2O_2$, 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	

Изготовленную толсто пленочную плату устанавливают в корпус и герметизируют. В ряде случаев используют бескорпусную герметизацию. Затем производят контроль параметров ИМС и ее испытания.

3.3. Анализ и оптимизация технологических процессов

Реализация на практике условий "вертикальной интеграции" приводит к возникновению проблемы раннего выявления и реализации резервов качества [7]. Существуют различные подходы к решению этой проблемы. В мировой практике наиболее яркое выражение нашли два различных подхода: первый состоит в выявлении дефектных изделий на испытаниях, имитирующих неблагоприятные режимы работы, второй - в разработке и применении методов выявления дефектов и несовершенств конструкции, технологии на наиболее ранних этапах проектирования и производства [24].

Принципиальное различие указанных подходов состоит в том, что в первом случае акцент делается на развитие методов отбраковки потенциально ненадежных изделий; во втором - на развитие методов контроля технологических процессов и конструкции изделия. Каждый из указанных подходов имеет свои обоснования.

В зависимости от назначения МЭА стоимость обнаружения и устранения в ней отказа изменяется в широких пределах. Так, цена отказа в бытовой аппаратуре минимальна, она возрастает для промышленной аппаратуры, становится еще более высокой для военной аппаратуры и максимально высокой - для аппаратуры космического назначения [25].

Указанное обстоятельство стимулирует разработчиков и изготовителей аппаратуры (прежде всего военной и космической) придерживаться на практике первого подхода к решению проблемы обеспечения качества. В этом случае качество аппаратуры и применяемых в ней компонентов считается тем выше, чем чаще и в более жестких условиях проводятся испытания. Естественно, что такой подход удорожает стоимость разработки и изготовления изделий. Поэтому альтернативный подход возник при стремлении избежать удорожания изделий и был применен в первую очередь при разработке бытовой и промышленной аппаратуры, назначение которой определяет относительно низкую стоимость отказа.

Указанные обстоятельства стимулируют разработчиков и изготовителей МЭА развивать такой подход к обеспечению ее качества, в котором реализуется оптимальное соотношение объемов контроля технологии и отбраковочных испытаний продукции в производстве, а

получаемая на этапах проектирования производства информация о качестве конструкции изделия и технологическом процессе его изготовления максимально используется для оптимизации разрабатываемого конструктивно – технологического варианта (КТВ). Под последним понимают как унифицированную конструкцию ряда образцов изделий микроэлектроники, обладающих сходными технологическими данными (быстродействие, потребление, плотность упаковки, уровень интеграции и т.п.), так и совокупность приемов и норм ее изготовления. Поскольку процесс разработки КТВ идет поэтапно, то методы анализа и оптимизации по своим возможностям должны соответствовать каждому этапу разработки. При этом результаты анализа и оптимизации на ранних этапах должны быть пригодны для использования их при дальнейшем совершенствовании КТВ на следующих этапах. В то же время многообразие разрабатываемых конструкций изделий данного КТВ затрудняет систематизацию и использование результатов анализа и оптимизации, полученных на ранних этапах, при дальнейшем совершенствовании разрабатываемого изделия. Отсутствие единых параметров качества изделия разрабатываемого КТВ, а также различие критериев эффективности производства (технологические потери, процент потенциально ненадежных изделий) этих изделий стимулируют проведение исследования КТВ на конкретных представителях. Так как конструкция любого типового представителя не может отражать особенности всего многообразия конструкций разрабатываемого КТВ, то информация, получаемая при исследовании и испытаниях указанного представителя, ограничена. Это делает оправданным применение для анализа и оптимизации КТВ специально разработанных тестовых схем. Тестовая схема (или набор тестовых схем) является универсальной моделью, характеризующей всю совокупность конструктивных особенностей изделий разрабатываемого КТВ. Применение тестовой схемы для анализа и оптимизации существенно расширяет объем получаемой информации, упрощает сам процесс измерений в процессе ее изготовления и испытаний, обеспечивает возможность широкого варьирования параметров конструкции изделия и входящих в него элементов (повышается информативность результатов при получении технологических ограничений), облегчает определение процессов деградации, характеристик надежности элементов и т.д. Применение тестовых схем в более полной мере позволяет определить нормы на:

- проектирование изделий данного КТВ;
- параметры технологического процесса изготовления КТВ;
- критерии отбраковки продукции;
- режимы испытаний и условия эксплуатации изделий данного КТВ.

Анализ и оптимизация КТВ предполагает получение и использование математических моделей [26].

Проектирование технологических операций включает оптимизацию выбора сочетаний материалов, выбор методов формирования обрабатываемых материалов требуемых свойств и размеров, а также режимов формирования физической структуры изделия. Решение находится в виде связи между параметрами качества элементов физической структуры (выходными параметрами) и параметрами режимов технологических операций при заданных значениях параметров конструкции (материалы и размеры элементов физической структуры изделия).

Проектирование технологической операции предполагает также выбор таких режимов ТП, соблюдение которых в определенных пределах обеспечит требуемые пределы воспроизведения параметра качества. Пусть элемент, формируемый на рассматриваемой операции, характеризуется параметрами качества $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_j$. На каждый из этих параметров при формировании элемента влияет в той или иной мере параметр технологического процесса, т.е. параметр, характеризующий условия формирования того или иного элемента физической структуры изделия $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$ (в качестве τ может быть температура, время, давление и т.д.). Требуется установить степень (весомость) влияния каждого из технологических параметров на любой из параметров качества. Выбор определяющих параметров режима формирования элемента может быть проведен по абсолютной величине коэффициентов в линейной зависимости между точностью формируемого информативного параметра (ξ_j) и точностью параметров ТП:

$$\Delta \xi_j = \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial \xi_j}{\partial \tau_i} \right|_{\tau_i = \tau_{opt}} \cdot \Delta \tau_{i, \tau}$$

где $\Delta \xi_j$ - точность формирования j -го параметра качества;

$\Delta \tau_{i, \tau}$ - точность поддержания i -го параметра ТП; n - число параметров ТП, влияющих на формирование j -го параметра качества.

Это уравнение может быть записано в виде

$$\Delta \xi_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \Delta \tau_{i, \tau} \quad (5)$$

Модель (5) позволяет определить вклад точности поддержания каждого технологического фактора в общую погрешность i -го параметра

качества формируемого элемента и таким образом установить требования к точности поддержания каждого из параметров ТП.

Поддерживать интегральные характеристики качества ТП (коэффициент выхода годных изделий, параметры, характеризующие надежность изделий), а следовательно и качество продукции можно при помощи систем статистического регулирования технологических процессов (ССРТП). Основой для построения наиболее эффективно функционирующих систем являются зависимости коэффициента выхода годных изделий или показателей надежности от параметров формируемой физической структуры:

$$P = f(\{\Delta \xi_j, \sigma_{\xi_j}\}), \quad (6)$$

где P - коэффициент выхода годных изделий, %; $\Delta \xi_j$ и σ_{ξ_j} - характеристики уровня настройки и точности параметра, формируемого на i -й операции.

Разработчику ТП анализ таких моделей позволяет определить оптимальные параметры режима с учетом выбора материалов, требуемую точность параметров ТП, структуру и нормы операционного контроля продукции.

В то же время анализ и оптимизация новых конструктивно-технологических вариантов по качеству и надежности предусматривает определение технологических ограничений, выбор оптимальных параметров конструкции и установление эксплуатационных нагрузок. Решение первой задачи сводится к поиску областей изменения конструктивных параметров изделия, выход за которые приводит к потере эффективности ТП.

Для определения условий эксплуатации изделий, изготавливаемых по разработанному КТВ, требуется установить статистические или детерминированные зависимости характеристик качества (надежности) от уровня нагрузок и времени воздействия при эксплуатации:

$$\frac{\Delta x}{x} \left(\frac{\Delta t}{N} \right) = f(p_1, p_2, \dots, p_k, t), \quad (7)$$

где $\frac{\Delta x}{x}$ - относительное изменение параметра качества; $\frac{\Delta t}{N}$ - доля

катастрофических отказов. p_1, p_2, \dots, p_k - уровни различных видов нагрузок, t - время.

По данной методике авторами [27] установлены технологические ограничения на ширину резистивного элемента ($b_{\min} = 200 \mu\text{м}$) и рекомендовано ввести конструирование схем с наибольшим заполнением площади подложки.

В работе [28] для обоснования технологических ограничений при конструировании прецизионных резистивных плат также была

установлена соответствующая статистическая связь. Для определения стабильности элемента в условиях эксплуатации (под электрической нагрузкой) учитывались следующие факторы: N - число квадратов резистивного элемента, S_k/S_R - отношение площади контактных площадок к площади резистивного слоя, b - ширина резистивного элемента.

Была получена модель:

$$\frac{\Delta R}{R} = 0,0335 + \frac{0,14}{N} - 0,002 \frac{S_k}{S_R} \frac{1}{N} + 0,0087 \frac{S_k}{S_R} b.$$

Она позволила принять решение о целесообразности конструировать элементы с числом квадратов, меньшим двух.

Установление связей типа (7) предусматривает получение как физических, так и статистических моделей отказа. Эти связи устанавливаются в процессе информативных испытаний: исследовательских, определительных и типовых (таблица 7).

3.4. Аттестация технологических процессов по точности и стабильности

Усложнение КТВ компонентов МЭА проявляется в увеличении общего числа операций в технологических маршрутах. Так, если в производстве пассивных тонкопленочных плат ГИМС на жестких подложках число операций равно 20...30, то для коммутационных плат БГИМС на гибком основании оно составляет около 70, а для полупроводниковых БИС в ряде случаев превышает 100.

С усложнением ИМС и ростом сложности ТП увеличивается число параметров физической структуры, оказывающих значимое влияние на функциональные параметры. Формируемые в ходе ТП параметры физической структуры, в свою очередь, определяются задаваемыми на различных операциях режимами обработки (режимными параметрами) - по нескольку важнейших параметров для каждой операции, причем зачастую на формирование одного параметра физической структуры оказывают влияние различные параметры с нескольких операций.

В этих условиях резко возрастает значимость оптимизации ТП по точности на стадии его разработки с целью установления таких допусков на параметры физической структуры и режимные параметры, соблюдение которых позволит обеспечить максимально возможный и устойчивый выход ИМС и их надежность.

Практика показывает, что передача в производство неоптимизи-

Таблица 7

Виды информативных испытаний

Вид испытаний	Задача испытаний	Цель испытаний
Этап НИОКР		
Исследовательские	Выявить процессы деградации, установить механизм отказов и диапазон нагрузок, ускоряющих механизмы отказов	Оптимизация КТВ. Определение режимов технологических испытаний. Совершенствование тестовой схемы как инструмента получения информации
Определительные	Установить показатели надежности элементов разработанного КТВ. Уточнить допустимые и отбраковочные признаки внешнего вида и параметров электрофизических изменений	Определить пригодность разработанного КТВ для применения в МЭА. Определить пригодность производства для изготовления такого КТВ
Этап изготовления опытного образца		
Типовые	Установить направления и количественные оценки в характеристиках качества и надежности элементов при совершенствовании КТВ	Определить целесообразность изменений разработанного КТВ

рованных ТП приводит к резкому увеличению сроков их освоения, колебаниям коэффициента выхода годных изделий и показателей надежности. В ряде случаев, особенно для сложных КТВ БИС, в течение длительного времени могут периодически отмечаться случаи так называемой «потери технологии».

Способствовать передаче в производство только оптимизированных процессов может их аттестация на стадии разработки. Подобно тому, как перед сдачей продукции потребителю ОТК проводит ее контроль, перед внедрением разработанной технологии в производство необходимо проводить ее аттестацию.

Для проведения аттестации нужно, прежде всего, сформулировать требования, которым должен удовлетворять оптимально разработанный по точности ТП.

Будем считать оптимально разработанным такой ТП, для которого.

- выделены важнейшие параметры формируемой физической структуры, оказывающие значимое влияние на выход годных и надежность ИМС.

- назначены оптимальные границы на эти параметры, обеспечивающие максимально возможный выход годных и надежность.

- разработаны методики операционного контроля всех важнейших параметров физической структуры, обеспечивающие их достоверный и объективный контроль.

- обеспечивается при помощи регулируемых режимных параметров устойчивое во времени нахождение важнейших параметров физической структуры в установленных для них оптимальных границах.

Сложный ТП изготовления изделий микроэлектроники можно создать лишь на основе системного подхода. Поэтому еще одной из задач аттестации ТП на стадии их разработки является реализация системного подхода при создании ТП.

Следует подчеркнуть особо, что аттестация технологии по точности и стабильности является обязательной, так как ни высокий уровень автоматизации, ни качественное выполнение технологической документации и т.п. сами по себе еще не могут гарантировать оптимальности разработанного процесса, а следовательно, и процесс аттестации, построенный без учета этих показателей, будет во многом носить формальный характер и его нельзя считать эффективным.

В работе [29] предложено аттестационно проводить по техническому уровню технологических операций.

Ниже остановимся на аттестации ТП по точности и стабильности.

Для аттестации технологии по этим критериям чаще всего используют коэффициент выхода годных изделий. В работе [7] показано, что применение этого показателя для оценки точности технологии имеет ряд недостатков и может считаться правомерным лишь при определенных условиях.

Было предложено использовать развитый подход к оценке точности технологических операций. Аттестовать ТП по точности - это значит провести оценку степени соответствия фактической точности всех его основных операций (блоков операций) оптимальным нормам, установленным при оптимизации технологии на стадии ее разработки из условия обеспечения максимального значения коэффициента выхода годных изделий и их надежности.

Степень этого соответствия необходимо выразить количественным показателем, на основании которого аттестуемому ТП присваивается одна из следующих категорий качества:

- высшая, соответствующая оптимально разработанному ТП, который может быть рекомендован к внедрению в производство без доработки;

- первая, соответствующая оптимально разработанному ТП, который может быть рекомендован к внедрению с последующей доработкой (например, связанной с повышением точности одной или нескольких операций);
- вторая, соответствующая неоптимально разработанному ТП, требующему обязательной доработки перед внедрением в производство.

Присвоение ТП или блоку ТП одной из трех категорий качества проводится после сравнения показателей точности и стабильности с установленными на них нормами для каждой категории.

Данная методика может быть эффективно использована как для аттестации ТП на этапе разработки (рисунок 7), так и для внутривзводской аттестации.

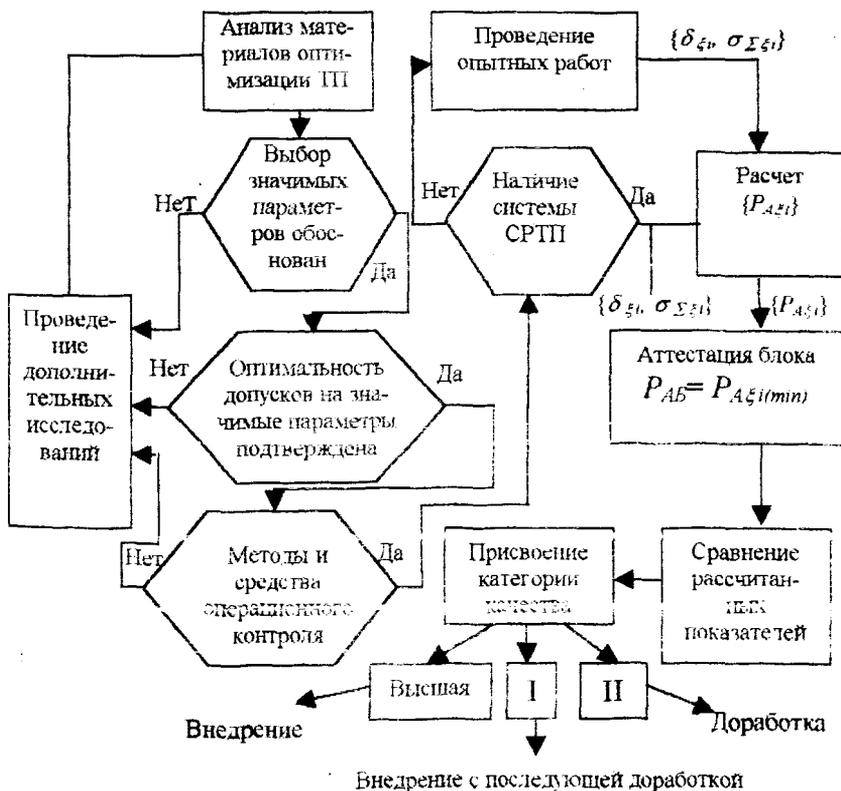


Рис. 7. Схема аттестации блока ТП по точности на этапе разработки перед внедрением в производство

Условно процесс аттестации можно разделить на два этапа. На первом этапе экспертной комиссией на основании анализа материалов, представленных разработчиком ТП, оценивается обоснованность выбора значимых параметров физической структуры и оптимальность назначенных на них допусков, а также рассматривается вопрос о том, обеспечивают ли разработанные методы и средства операционного контроля достоверный и объективный контроль выделенных важнейших параметров физической структуры по статистически обоснованным планам.

При получении отрицательного результата по одному из указанных пунктов принимается решение о проведении дополнительных исследований, формулируется задача, определяется методика, объем и сроки их проведения.

При положительных результатах переходят ко второму этапу аттестации - оценке степени соответствия фактической точности блока ТП заданным требованиям.

Максимальный эффект получается при комплексной аттестации технологии как на стадии ее разработки, так и на стадии ее эксплуатации в производстве. При этом наряду с качеством разработки ТП оценивается и качество цеховой исполнительской дисциплины. В результате снижается неопределенность при принятии решений, повышается оперативность и действенность процесса управления качеством.

4. АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ И ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ И КОМПОНЕНТОВ МИКРОСБОРОК

4.1. Роль анализа дефектов и отказов в решении проблемы качества

Исходной информацией для повышения качества и надежности ИМС и МЭА на различных этапах их жизненного цикла в основном служат результаты анализа дефектов и отказов, устанавливающие причинно-следственные явления и обуславливающие физико-статистическую модель отказа. Данному вопросу уделено большое внимание в теоретическом и практическом аспектах [30-35]. Разработанные частные алгоритмы и методы анализа отказов, как правило, помогают определить место, внешнее проявление и вид отказа, но не позволяют однозначно идентифицировать механизмы и первопричины (причинно-следственные явления) отказа. Многообразие дестабилизирующих факторов, механизмов и причин отказов ИМС при необходимости однозначной идентификации обусловили рассмотрение методологии, базирующейся на многофакторном дисперсионном анализе, «основ криминалистики отказов» с выдвижением правомочных рабочих гипотез, их исследования и итеративной проверки. В [36] под «криминалистикой отказов изделий» понимается новый раздел в теории и практике надежности микроэлектроники, включающий специальные приемы, методы и средства сбора, анализа и оценки детерминированных, стохастических и неизвестных (неизученных) случайных факторов, позволяющих однозначно идентифицировать виды, механизмы и причины отказов изделий.

Под «анализом отказа» понимается процесс, позволяющий определить как причину несоответствия изделия заданным требованиям, так и причину его полного отказа. Для случая МСБ, используемых в космической спецаппаратуре, видимо, будет правильным определение и причин условных отказов. Такие отказы обычно выявляются на этапе исследовательских испытаний. Выявление причин условного отказа является задачей более сложной. Этот процесс должен предусматривать широкий круг исследований с целью установления связи между дефектами ИМС и неправильными испытаниями или применением и эксплуатацией. Анализ отказов, будучи основной частью системы управления качеством, должен охватывать все этапы жизненного цикла ИМС, МЭА и удовлетворять поставленным задачам, т.е. обеспечивать достоверными и однозначными данными о причинно-следственных

явлениях, которые ответственны за место, вид, механизм и причину отказа.

Сложность проблемы однозначной идентификации механизма отказа с установлением первопричин обусловлена тем, что один и тот же отказ с одним и тем же внешним проявлением может быть результатом совместного или раздельного воздействия различных механизмов, а развитие одного и того же механизма может быть стимулировано конструктивно-технологическими решениями ИМС, МЭА или эксплуатационными факторами. Проведение анализа ограничено современным технологическим уровнем и возможностями контрольно-измерительного оборудования и отсутствием методологической основы анализа, позволяющей однозначно идентифицировать механизмы отказов.

В основу предложенной в работе /36/ методологии анализа отказов положены функционально-корреляционные итеративные методы исследования, «криминалистические» методы выдвижения и проверки рабочих гипотез о вероятных механизмах и причинах отказов, которые базируются на оперативной информации о режимах и условиях эксплуатации, а также на классической теории развития физических, химических и других обратимых и необратимых процессов в структуре БИС. При таком подходе предусматривается: классификация отказов, анализ исходной информации, связанной с отказавшим изделием, и требования к ее полноте, типовые итеративные алгоритмы анализа и установления места, характера проявления и внешнего вида отказа в МЭА, БИС и элементах БИС, методы локализации места отказа в МЭА, БИС и элементах БИС, методология построения и проверки рабочих гипотез о механизме отказа, методы исследования и анализа механизма отказов, методология построения и проверки рабочих гипотез о вероятных причинах отказа, математическая обработка результатов анализа отказов, создание банка данных о характерных видах, внешнем проявлении, механизме и вероятной причине отказа с использованием ЭВМ.

В зависимости от этапов проводимых работ задачами анализа дефектов являются: на стадии отработки ТП и конструктивных решений ИМС - получение информации о характеристиках ТП (воспроизводимость, номенклатура, механизм и статистика дефектов, характер или закон распределения дефектов на пластине, в партии и между партиями, причины дефектов), формирование критериев и значений показателей качества, в условиях серийного производства - получение информации по установленным критериям дефектов, характеризующей стабильность ТП и необходимой для оперативного статистического регулирования, а при резком увеличении номенклатуры или статистики дефектов, а также при нарушении законов распределения

сформированных свойств на пластине (плате), внутри партии и между партиями - получение информации, характеризующей причины нарушения ТП. Объем и глубина исследования определяются решаемыми задачами анализа дефектов.

4.2. Основные виды и причины отказов ИМС

Всесторонний анализ причин потери работоспособности ИМС при их испытаниях и эксплуатации в составе РЭА позволяет сделать вывод о том, что на современном этапе развития микроэлектроники преобладают внезапные отказы, вызванные разрушением элементов конструкции из-за несовершенства отдельных технологических операций, нарушением или ошибками в процессе их производства, несоблюдением требований нормативно-технической документации на этапе применения.

Основным источником внезапных отказов ИМС по данным [16] является нарушение электрической цепи (таблица 8).

Причинами обрывов электрических цепей является недостаточная прочность сварных соединений в местах контактов разнородных материалов, химическое, электрическое, механическое разрушение металлических тонкопленочных проводников, дефекты сборки микросхем.

Короткие замыкания в электрических цепях микросхем обусловлены, в основном, дефектами фотолитографии и диэлектрических пленок, возникновением каналов с инверсной электропроводностью, дефектами кристаллической решетки полупроводникового кристалла, дефектами сборки.

Основными причинами параметрических отказов ИМС, выражающихся в большинстве случаев, в увеличении токов утечки, являются возникновение каналов электропроводности из-за миграции подвижных зарядов в окисной пленке, загрязнения поверхности кристалла и разгерметизация корпуса.

С точки зрения физических причин отказы условно делятся на три категории:

1. Объемные, связанные с явлениями в объеме на полупроводникового кристалла.
2. Поверхностные, обусловленные явлениями на поверхности кристалла.
3. Контактные, обусловленные нарушением контактных соединений и обрывом тонкопленочных проводников.

Возникновение отказов, связанных с объемными явлениями, можно объяснить появлением или развитием в процессе эксплуатации ИМС структурных несовершенств полупроводникового кристалла

(дислокаций, дефектов упаковки, микротрещин и т.д.). либо перераспределением легирующих примесей в объеме кристалла.

Дислокации и другие дефекты кристаллической структуры, трещины, деформации и механические напряжения в кристалле, развиваясь в процессе эксплуатации микросхемы под воздействием термических и механических нагрузок, могут вызвать существенные изменения электрических характеристик, происходящие обычно постепенно.

Таблица 8

Распределение внезапных отказов ИМС по видам и причинам (обобщенные данные)

Вид отказа	Причины отказа	Доля отказов, %
Обрыв сварного соединения	Малая механическая прочность сварного соединения. Образование интерметаллических соединений. Превышение допустимого уровня механических нагрузок.	20
Обрыв тонкопленочных проводников и резисторов	Механические повреждения, подтравы, некачественное запыление ступенек рельефа. Повышение допустимого уровня тока. Коррозия (химическая, электрохимическая).	20
Короткое замыкание и повышенный ток утечки	Загрязнение поверхности диэлектрических пассивирующих пленок или корпуса. Дефекты диэлектрика. Повышение допустимого уровня напряжений.	22
Дефекты фотолитографии	Ложная диффузия. "Недотрав" или "перетрав" оксидов и металлов. Неполное удаление фоторезиста.	10
Объемные дефекты кристалла	"Смывание" в транзисторах с тонкой базой Пробой в местах локальных дефектов структуры.	10
Дефекты сборки и корпуса вследствие негерметичности	Негерметичность, корпуса, коррозия деталей корпуса.	15
Прочие	Механические повреждения гибких проводников. Инородные частицы в корпусах. Некачественная посадка кристалла на основание	3

Основными механизмами деградации свойств эпитаксиальных и диффузионных слоев микросхем с «мелкими» р-п переходами являются движения дислокаций, изменение внутренних напряжений кристаллической решетки, рекристаллизация, распад твердых растворов и др. Указанные процессы приводят к изменению таких характеристик, как концентрация, подвижность, время жизни неосновных носителей заряда, а значит повышению токов утечки, снижению пробивного напряжения переходов, ухудшению быстродействия микросхем.

Поверхностные отказы связаны с изменением следующих характеристик системы кремний- двуокись кремния:

величины подвижного и неподвижного заряда в окисле;

стабильности заряда в окисле при воздействии электрического поля и повышенной температуре;

скорости поверхностной рекомбинации.

При работе микросхем на границе раздела Si- SiO₂ и в приповерхностной области полупроводякового кристалла происходит перераспределение электрических зарядов различной природы, присутствующих на поверхности и внутри пленки SiO₂ (ионы, дырки, избыточные атомы Si, «ловушки» и др.), что приводит к существенным изменениям характеристик р-п переходов и иногда к появлению поверхностных каналов с инверсной электропроводностью кремния. Вследствие этого явления возрастают токи утечки и ухудшаются параметры микросхем.

Наиболее чувствительны к состоянию окисла МОП- структуры, в которых эффект поверхностной миграции ионов усиливается вследствие того, что окисел под затвором является «рабочим» элементом микросхемы и определяет пороговое напряжение- основную электрическую характеристику схемы.

Контактные отказы происходят в контактных соединениях. В ИМС обычно используются два типа контактных соединений:

тонкопленочные металлические проводники, применяемые для внутрисхемной разводки между элементами на кристалле (плате);

соединения тонкопленочных металлических контактных площадок на кристалле с внешними выводами (траверсами) корпуса, выполняемые обычно с помощью золотых или алюминиевых микропроводников. Отказы контактных соединений проявляются чаще всего как обрыв электрической цепи или увеличение контактного сопротивления и обусловлены двумя механизмами:

скоплением вакансий в различных областях внутрисхемной разводки;

образованием областей с электроизолирующими свойствами на границе раздела разнородных материалов, которые используют в конструкции микросхемы.

Обобщенные данные по относительному распределению видов отказов для биполярных ИМС различной степени интеграции приведены на рисунке 8, для МОП- микросхем – на рисунке 9.

Особую и довольно значительную группу отказов ИМС при их работе в составе РЭС (а также на этапах производства и испытаний РЭС) составляют отказы, обусловленные нарушением требований и рекомендацией по применению ИМС в части схмотехнического и конструктивного решений при разработке РЭС на микросхемах (таблица 8).

4.3. Методология анализа дефектов

В зависимости от этапа проводимых работ задачи подсистемы анализа дефектов соответственно различны, а именно: получение информации о характеристиках обрабатываемой технологии и выработка методов контроля и критериев ее комплексного количественного описания, получение информации о характере и особенностях номенклатуры неисправностей и обработка методологии количественного описания технологичности конструкции ИМС, позволяющей выявить ее «слабые места», получение информации, характеризующей стабильность ТП и необходимой для его оперативного регулирования, выявление причин нарушения стабильности технологии, получение информации о причинах появления дефектов, исследование условий хранения и эксплуатации изделий, их электрических и климатических режимов использования, моделирование дефектов с целью их долгосрочного прогнозирования.

При этом объем и глубина исследования определяются конкретными задачами анализа. В частности, при обработке технологии или при оптимизации конструкции нового изделия необходимы глубокие исследования причин и механизмов возникновения установленной номенклатуры дефектов, а в условиях серийного производства можно ограничиться контролем стабильности ТП с применением тестовых структур или тестовых элементов. На этапе обработки технологии и резком снижении процента выхода годных в условиях серийного производства поставленные задачи по анализу дефектов могут быть решены с применением методов [31] для получения полных характеристик технологии.

В серийном производстве применяют оперативные методы анализа дефектов и, как правило, используют результаты операционного контроля электрических и электрофизических параметров изделия, априорную информацию о сформированных свойствах на технологических операциях и их статистическое распределение, а также

номенклатуру дефектов, характерную для заданного отработанного процесса.

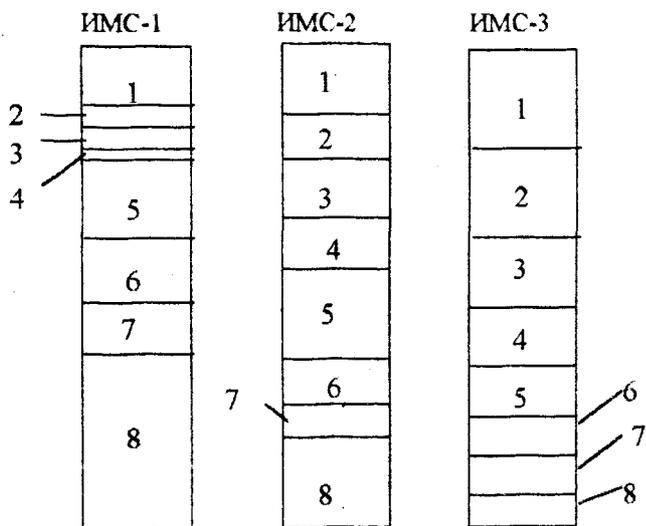


Рис 8. Относительное распределение видов отказов биполярных ИМС и БИС, обусловленных:

- 1 - дефектами металлизации, 2 - дефектами диффузии,
- 3 - наличием инородных частиц; 4 - неопознанными причинами;
- 5, 6, 7 - дефектами кристалла, оксида и герметизации кристаллодержателя, соответственно; 8 - неправильным применением

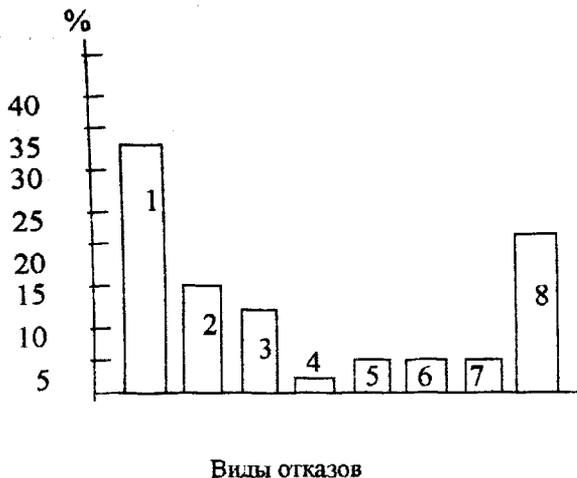


Рис. 9. Распределение видов отказов МДП-БИС, обусловленных:

- 1 – дефектами оклада;
- 2 – электрическими перегрузками;
- 3 – зарядовой нестабильностью;
- 4-7 – дефектами металлизации, в корпусе, монтажа, фотолитографии, соответственно;
- 8 – прочими дефектами

Методология, алгоритм и методы анализа готовых ИМС полностью совпадают с методологией, алгоритмом и методами анализа отказов, предложенными в [31]. При этом исключаются методы анализа влияния эксплуатационных факторов. Сложность и многофакторность технологии изготовления ИМС, ее большая протяженность во времени, наличие значительного числа разнородных по своему характеру и формируемым свойствам операций, наличие неизвестных факторов, а также ряда механизмов у одного вида дефекта и возможных причин одного и того же механизма обуславливает системный подход при анализе дефектов.

Таблица 9

**Нарушение условий применения и связанные с ними
виды отказов ИМС**

Условия применения (конструкция, схемотехника)	Возможный вид отказа
<p>Питание РЭА от источников, дающих в моменты включения и выключения выбросы напряжения, превышающие допустимые по ТУ для ИМС; связь микросхем с трансформаторами, дающими выбросы напряжения в переходных режимах</p>	<p>Обрывы гибких проводников с оплавлением концов. Обугливание защитных покрытий активных элементов гибридных ИМС Обрывы металлизированной разводки на кристалле. Короткие замыкания переходов и тонкопленочных конденсаторов. Короткие замыкания цепей вследствие образования каналов и проколов оксида под действием термомеханических напряжений</p>
<p>Режим, превышающий нормы и требования ТУ (по температуре и электрической нагрузке)</p>	<p>Ускорение развития известных механизмов отказов и сокращение срока службы Возникновение механизмов отказов, не известных или не характерных для ИМС при нормальной эксплуатации</p>
<p>Недостаточная жесткость конструкции (прогибы печатных плат, резонансные явления и т.д.)</p>	<p>Поломка выводов при монтаже Растрескивание стеклотермоизоляторов и разгерметизация корпусов. Отслоение плат и кристаллов от оснований корпуса</p>

Этот подход включает алгоритмы и методы анализа дефектов применительно для каждого вида технологической операции, ее характера (регулируемый или управляемый) степень влияния режимов и условий i -ой технологической операции на сформированные свойства, полученные на $(i-1)$ -й технологической операции и формируемые свойства после $(i+1)$ -й технологической операции; математическую обработку результатов измерений электрических и электрофизических параметров изделия с целью определения детерминированных величин и технологических режимов, влияющих на характер, механизм и причину дефектов; статистическую обработку результатов с целью установления характеристик технологии и функций распределения сформированных

свойств и выявления степени несоответствия текущего процесса установленным нормам; методологию идентификации механизмов и причин дефектов, обусловленных детерминированными и стохастическими технологическими факторами; создание банка статистической информации по видам и механизмам дефектов, необходимого для формирования критериев качества, оценки характеристик ТП, его аттестации и стабилизации при отработке и в условиях серийного производства.

Практика показывает, что в производственных условиях анализ дефектов следует производить в два этапа: экспресс-анализ и углубленный анализ физической природы дефекта. В рамках предложенного в [36] системного подхода к текущему анализу дефектов общие требования можно сформулировать следующим образом: оперативность и простота, быстрая формализуемость, направленность на выявление основной причины массовых дефектов, использование стандартного измерительного оборудования.

Алгоритмы проведения анализа дефектов в значительной степени зависят от конкретной технологии и изготавливаемого изделия. Поэтому обобщенный алгоритм для этапов отработки процессов и изделий (рис.10) требует уточнения и разработки частных алгоритмов для решения конкретных задач.

Результаты анализа характеристик ТП и связанных с ними дефектов являются основой для формирования системы и методов контроля, разработки критериев качества и понятий дефекта и критических режимов технологических операций, а также являются основой для организации анализа дефектов и регулирования ТП в условиях серийного производства. Анализ и идентификация дефектов могут быть осуществлены известными диагностическими методами.

Для анализа и идентификации дефектов, приводящих к отклонению электрических параметров элементов схемы и изделия в целом, исходными предпосылками являются: аналитические связи между электрическими параметрами ИМС и ее элементами, аналитические связи между электрическими параметрами ИМС и электрофизическими параметрами физической структуры и геометрическими размерами элемента, функциональные или корреляционные связи между электрическими параметрами структур и геометрических размеров элементов с технологическими режимами и параметрами исходных материалов, а также сформированные свойства на предшествующих технологических операциях.

При серийном производстве суть анализа состоит в статистической обработке результатов контроля и измерений, в построении гистограммы распределения электрофизических параметров ИМС и сравнении полученных данных с заданными в НТД. Технологический процесс

считается нарушенным, если наблюдаются новые механизмы и причины дефектов или статистическое распределение известных и регламентиро-

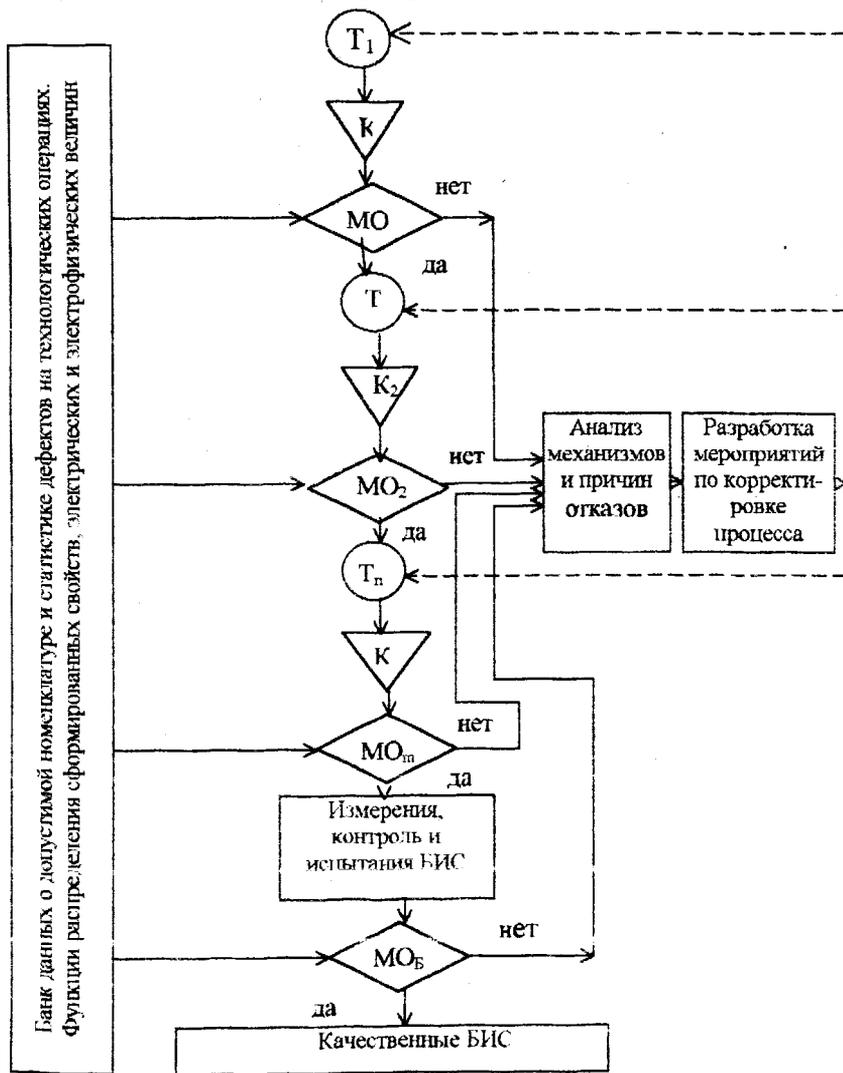


Рис. 10. Обобщенный алгоритм анализа дефектов БИС

ванных дефектов превышает установленные нормы, а функции распределения электрофизических величин отличаются от установленных.

4.4. Алгоритмы анализа отказов

Условием корректного анализа отказов является наличие достаточной информации об изделии, квалифицированном как отказавшее, и информация об условиях, при которых зафиксирован отказ [36].

Внешний осмотр и измерение электрических параметров ИМС, МСБ при нормальных условиях окружающей среды и в условиях и режимах, при которых квалифицирован отказ, являются важнейшими этапами, обуславливающими полноту информации об отказе, так как сопоставление полученных результатов с исходной информацией позволяет выдвинуть рабочую гипотезу о месте, характере отказа и разработать оптимальный алгоритм анализа.

Невозможность повторения одного и того же исследования при анализе отказов, связанного с нарушением целостности образца и условий работы, возможная потеря информации об отказе из-за неверного выбора последовательности неразрушающих и разрушающих методов экспериментальных работ накладывают ряд требований и ограничений на алгоритмы анализа МСБ и МЭА. Основными из них являются: максимальное использование неразрушающих методов исследований по выявлению условий возникновения отказа, моделирование штатных эксплуатационных факторов, а также исследование характера проявления отказа, анализ методик измерений и характеристик контрольно-измерительного и испытательного оборудования, при которых зафиксирован отказ, использование разрушающих методов исследований и контроля только тогда, когда неразрушающими методами контроля нельзя извлечь дополнительную информацию, применение каждого последующего метода исследования должно предусматривать получение дополнительной информации, но не вносить дополнительных дефектов, искажающих основные механизмы и причины отказа. Автором [36] предложен обобщенный алгоритм проведения анализа отказавшей МЭА (рисунок 11).

Данный алгоритм предусматривает моделирование возможных эксплуатационных факторов для установления устойчивых и перемежающихся отказов.

На рисунке 12 приведен обобщенный алгоритм проведения отказов ИМС, который предусматривает следующие этапы: исследование всех возможных механизмов и причин отказов, предварительное заключение о характере проявления отказа, а также о режимах эксплуатационных воздействующих факторов на ИМС, оценку качества технической

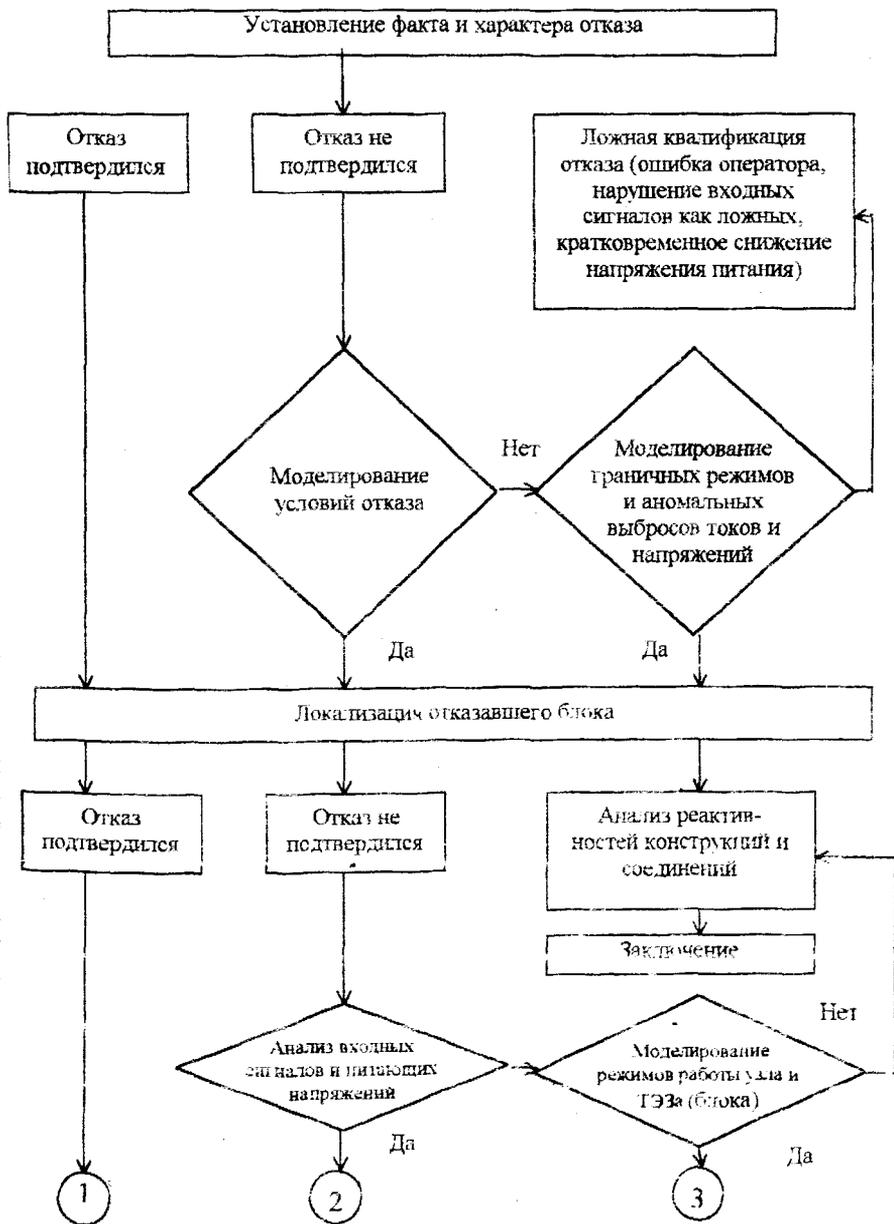


Рис. 11. Собщенный алгоритм проведения анализа отказов БИС в МЭА

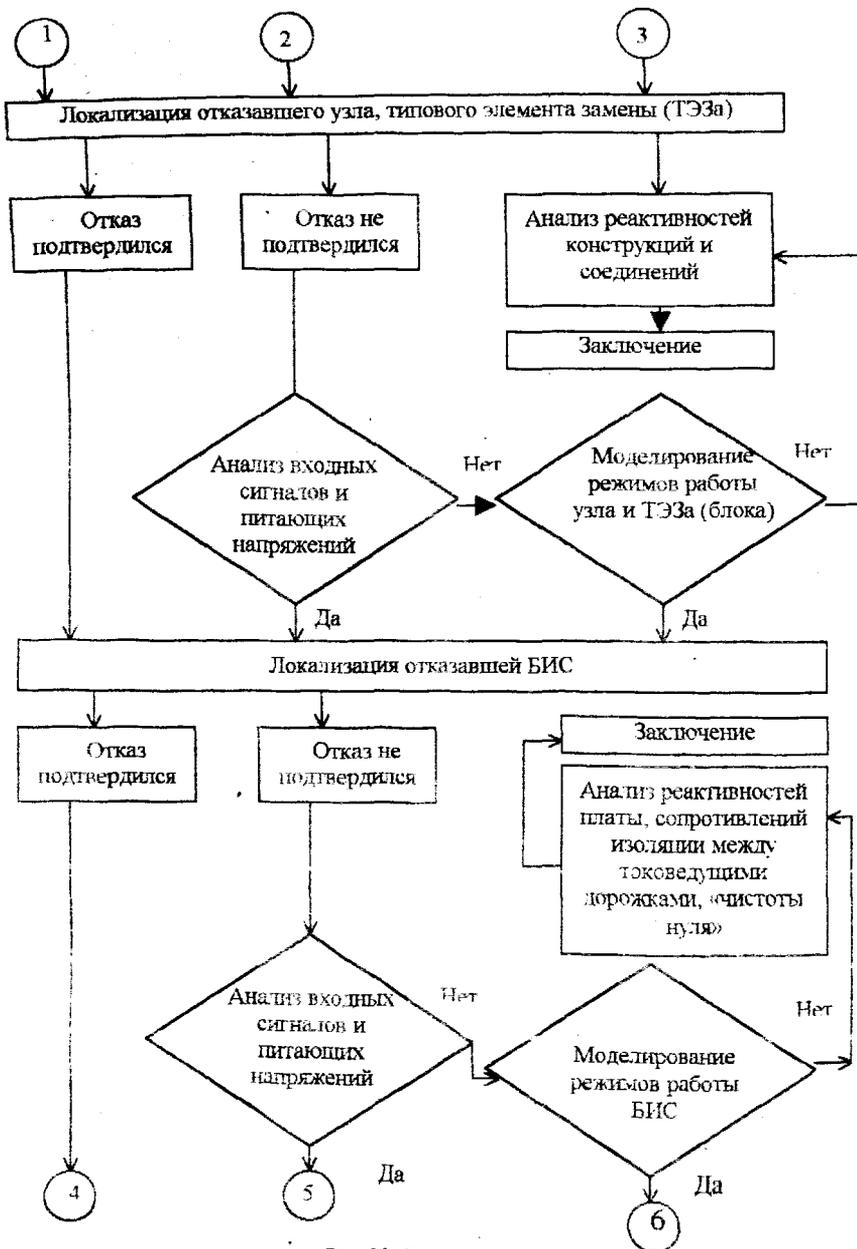


Рис.11. Продолжение

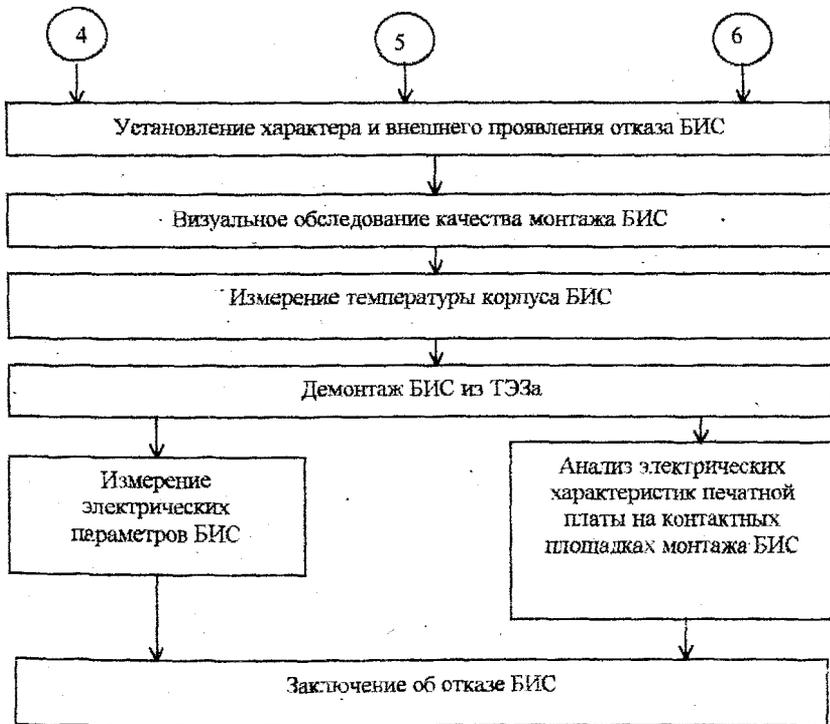


Рис.11. Окончание

документации (ТУ), технологии изготовления, методов контроля качества на приемосдаточных испытаниях и входном контроле.

В работе [16] предложены следующие основные принципы организации и обеспечения анализа отказов на предприятии:

1. Анализ отказов должен осуществляться на основе типовой программы, определяющей маршрутную последовательность операций, необходимых и достаточных для проведения анализа. Типовой маршрут (программа) является общим для ИМС широкого класса, а методы выполнения каждой операции специфичны и зависят от конкретных микросхем.
2. Для обеспечения анализа отказов необходимо наличие полного комплекта документации, позволяющей выполнить поэтапно все процедуры маршрутной схемы. Часть документации (функциональные схемы, ЧТУ и др.) составляют в обязательном порядке при разработке изделия, другую часть (диагностический словарь,

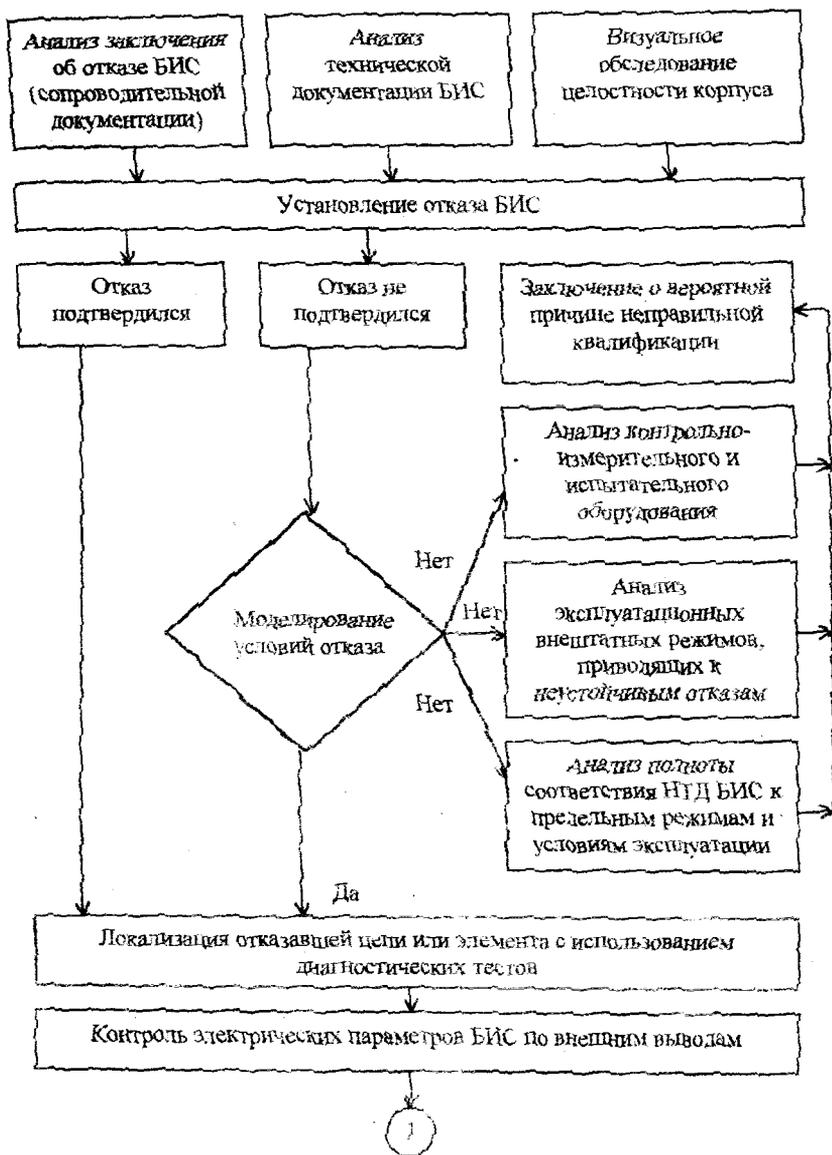


Рис. 12. Обобщенный алгоритм проведения анализа отказов БИС



Рис. 12. Окончание

руководство по диагностике, эталоны качества и др.) разрабатывают дополнительно при освоении производства изделий.

3. Организацией и обеспечением анализа отказов на предприятии должно заниматься специализированное подразделение, укомплектованное квалифицированными специалистами и необходимым оборудованием.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСБОРОК И МИКРОУЗЛОВ

5.1. Проблемы обеспечения заданной точности

Групповые методы изготовления ИМС, МСБ и микроузлов не обеспечивают высокой точности элементов, которые определяют точность выходных характеристик. Так, резисторы и конденсаторы в тонкопленочном исполнении имеют гарантированный разброс $\pm 10\%$, а в толстопленочном - $\pm 20\%$. Компоненты (навесные активные элементы) характеризуются еще большими погрешностями. Так, например, у транзисторов разброс коэффициентов усиления может достигать $\pm 50\%$, а падение напряжения база-эмиттер может составлять $\pm 20\%$ [37]. Такие широкие допуски на параметры не позволяют создавать прецизионные микросхемы. Особенно сильно это сказывается на точности линейных интегральных микросхем, в которых используются активные элементы с идентичными характеристиками в широком температурном диапазоне (дифференциальные усилители, электронные ключи для ЦАП и АЦП и др.). Поэтому основным направлением повышения точности выходных параметров линейных ИМС является компенсация производственных погрешностей активных и пассивных элементов.

Основными параметрами, характеризующими работу линейных радиоэлектронных устройств, являются амплитудночастотная и фазочастотная характеристики. Они дают возможность определять различные показатели, характеризующие работу РЭА: усиление на фиксированной частоте и в полосе частот, избирательность, чувствительность, фазу сигнала на фиксированных частотах, отношение сигнал-шум, нелинейные искажения и т.д. В РЭС амплитудночастотная характеристика (АЧХ) формируется активными и пассивными RC-цепями и резонансными LC-контурами, а фазочастотная характеристика (ФЧХ) формируется пассивными RL-, LC-, RC-цепями и взаимосвязанными контурами.

К устройствам, регулируемым по АЧХ, можно отнести: усилители низкой частоты, усилители высокой и промежуточной частоты, электронные вольтметры переменного тока и импульсные вольтметры, блоки передающих устройств, связанной аппаратуры, аппаратуры радиорелейных линий связи и т.д.

К регулируемым по ФЧХ устройствам РЭС можно отнести: фазовые усилители, модуляторы, фазовращатели, узкополосные фазовые фильтры, генераторы, электронные фазометры, блоки передающих устройств аппаратуры радиорелейных линий связи и т.д.

Основной проблемой повышения точности ГИМС и МСБ является уменьшение погрешностей пассивных элементов, и особенно пленочных резисторов, так как именно резисторы, являясь самым распространенным элементом микросхем, в значительной степени определяют точность, надежность и соответственно выход годных изделий [37]. Так, в работе [38] показано, что при изготовлении партии ГИМС типа МИГ-1 процент выхода годных микроузлов составил 19,5%. При этом основная доля брака (61,9%) приходилась на операции изготовления резистивных слоев, а 38,1% - на остальные десять технологических операций. В распределении микросхем по 9 видам брака наибольшая его доля падает на отклонение резисторов от номинала - 36,3%. Это положение справедливо для большинства схем РЭС, но в особенности для прецизионных аналоговых устройств, например, ЦАП, использующих высокоточные резистивные элементы. В настоящее время пленочная технология не позволяет получить резисторы с погрешностью сопротивлений, меньшей $\pm 10\%$, что не удовлетворяет производство современных РЭС.

В связи с этим проблема обеспечения заданных допусков на пленочные резистивные элементы при изготовлении ГИМС и МСБ, тесно связанная с проблемой пленочных резисторов и резистивных матриц, является весьма актуальной и важной [39]. Технологическая точность изготовления пленочных резисторов определяется совокупностью производственных погрешностей. В [21] приведено уравнение погрешности, которое характеризует связь разброса выходного параметра ИМС с разбросом определяющих его исходных параметров. Оно выражено через поля рассеяния и коэффициенты, характеризующие законы рассеивания параметров.

Большое число технологических операций при производстве ГИМС приводит к значительному разбросу сопротивления пленочных резисторов. Так, для тонкопленочных резисторов наибольший вклад в результирующую погрешность сопротивления вносят погрешности, возникающие при напылении резистивных слоев. Главной из них является неодинаковое удельное поверхностное сопротивление ρ_s в пределах подложки. Разброс ρ_s может составлять $\pm(10-20)\%$.

В работе [37] разработаны мероприятия по повышению точности изготовления тонкопленочных резисторов на этапах напыления и формообразования (рисунок 13). Они сводятся к следующему:

1. Получение резистивных пленок с высокой однородностью ρ_s в пределах подложки.
2. Повышение воспроизводимости ρ_s в партии подложек.
3. Учет характера изменения ρ_s в пределах подложки при проектировании ГИМС.

4. Уменьшение погрешностей масочного метода.
5. Уменьшение погрешностей метода фотолитографии путем использования прогрессивных приемов, в частности применения фотонаборных машин, рентгенолитографии, голографии.

Однако точность изготовления ТПР на этапах напыления и формообразования значительно повысить не удастся. Более высокую точность можно получить методами подгонки и селективной сборки. Селективную сборку можно вести по одному параметру – сопротивлению R, по двум параметрам – сопротивлению R и температурному коэффициенту сопротивления (ТКС) и по трем параметрам R, ТКС и коэффициенту старения (КС).

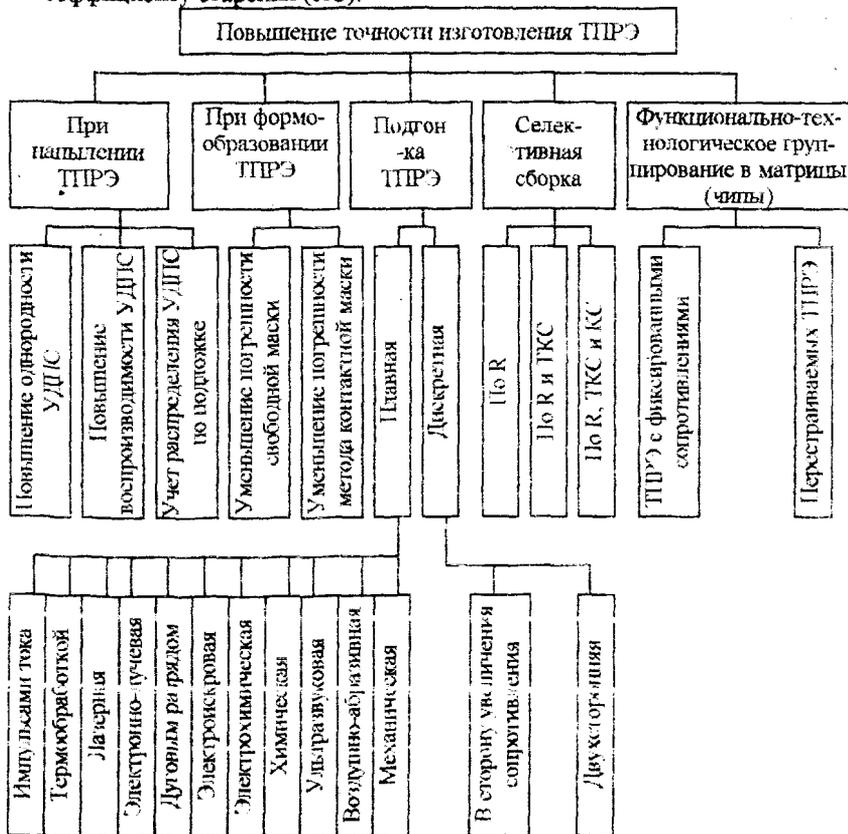


Рис. 13. Классификация методов повышения точности

В особую группу необходимо выделить функционально-технологический метод повышения точности пленочных элементов и увеличения выхода годных изделий, основанный на специализации производства. Применительно к резистивным элементам данный метод заключается в группировании ТПР в матрицы (чипы), изготавливаемые отдельно от остальных элементов микросхемы, с последующим монтажом на основной подложке ГИМС. При этом ТПР могут иметь фиксированные сопротивления или быть перестраиваемыми [40].

5.2 Классификация методов подгонки пленочных элементов

Подгонка резисторов может быть индивидуальной или групповой. Индивидуальная подгонка целесообразна при независимых отклонениях значений сопротивлений; в случае, если уход за пределы допуска вызван каким-либо доминирующим фактором для большинства резисторов на подложке, целесообразна групповая подгонка.

Величина сопротивления R тонкопленочного резистора определяется удельным сопротивлением материала, геометрическими параметрами напыленной пленки и выражается формулой:

$$R = \rho \frac{l}{at}, \quad (8)$$

где ρ - удельное сопротивление материала резистора;

l - длина резистора;

a - ширина резистора;

t - толщина резистора.

Как видно из выражения (8), величину сопротивления можно регулировать путем изменения ρ, l, a, t . Удельное сопротивление резистивных пленок изменяют окислением границ зерен, составляющих пленку. Толщину резистивного слоя можно регулировать в сторону уменьшения путем окисления поверхности пленки или удаления (механическим методом) поверхностного слоя. Удалением части резистивной пленки изменяют также ширину резистора. Длину резистивной полоски можно увеличить путем разрезания заранее предусмотренных шунтирующих перемычек из проводящего материала.

Известно несколько способов коррекции пленочных резисторов, основанных на удалении части материала резистивного слоя: механическое процарапывание, абразивная обработка, удаление материала с помощью электроэрозии, а также с помощью теплового воздействия пучка электронов, ионов или когерентного света (лазер).

Применяются, кроме того, методы электрохимического травления поверхности резистора, токовой корректировки, отжига резистивных слоев и другие (рис. 14).

При выборе оптимального варианта подгонки номиналов резисторов следует руководствоваться следующими соображениями:

- 1) выбранный метод подгонки должен обеспечивать требуемую точность номинала резистора;
- 2) операция подгонки не должна существенно уменьшать допустимую мощность рассеивания и стабильность резистора;
- 3) метод юстировки должен обеспечивать требуемое значение диапазона подгонки (величины изменения сопротивления);
- 4) операция подгонки должна легко поддаваться автоматизации.

Введение подгонки на этапе изготовления микросхемы целесообразно в том случае, если это может снизить процент брака, вызываемого разбросом номиналов резисторов, на 15-20%. Критерием для определения целесообразности подгонки является соотношение трудоемкости изготовления микросхемы без проведения подгонки и с подгонкой.

Известно выражение трудоемкости изготовления одной микросхемы с применением подгонки:

$$T_n = \frac{\beta_n}{\beta} T_0$$

где β_n - процент выхода годных микросхем с применением подгонки;

β - процент выхода годных микросхем без подгонки;

T_0 - трудоемкость изготовления одной подложки (микросхемы) без подгонки.

Таким образом подгонку резисторов на микросхеме выгодно проводить в том случае, если время, затрачиваемое на подгонку, не превышает t_n , $t_n \leq T_n - T_0$.

Если средняя трудоемкость подгонки одного резистора определяется временем t , то число резисторов, требующих подгонки, не должно быть

больше n : $n \leq \frac{T_n - T_0}{t}$.

5.3. Функциональная подгонка ГИМС и МСБ

Одним из наиболее прогрессивных и экономически оправданных методов компенсации производственных погрешностей электрических па-

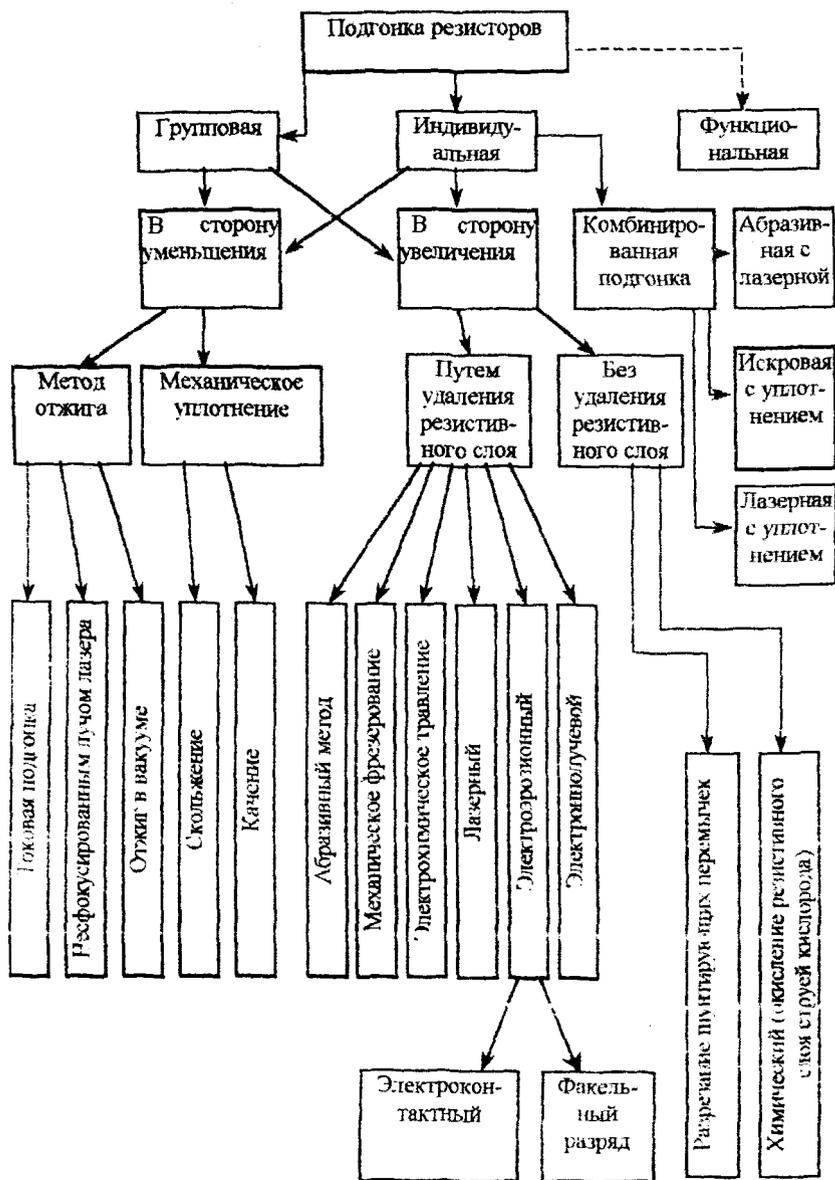


Рис. 14. Классификация методов подгонки

раметров элементов и компонентов линейных ИМС является функциональная подгонка (ФП).

Она аналогична процессу регулировки при навесном монтаже. Поэтому ее называют еще активной или динамической подгонкой [41]. Она производится после монтажа компонентов и заключается в изменении параметров тех пленочных элементов, которые в наибольшей степени влияют на выходные параметры готового изделия [42-44]. Например, в стабилизаторе напряжения величина выходного напряжения определяется величиной сопротивления одного из резисторов. На конечных стадиях производства схемы выполняется подгонка этого резистора, чтобы получить нужную величину напряжения. Таким образом, разработчика интересует не сама по себе величина сопротивления, получаемая при подгонке, а функция, контролируемая этим сопротивлением [42]. Можно также производить подгонку резисторов, контролирующих постоянную времени RC-цепи, напряжение сдвига уровня операционного усилителя, точку перегрузки стабилизатора напряжения, уровни срабатывания компараторов, величину аналогового выходного напряжения ЦАП, частоту генерации генераторов.

Перед разработчиками функционально подгоняемой МЭА ставятся следующие задачи:

1. Определение типов схем, которые подлежат ФП.
2. Оптимальный выбор подгоняемых элементов.
3. Определение оптимальной стратегии ФП.
4. Выбор начальных допусков подгоняемых элементов.
5. Выбор вида подгонки и разработка «инструмента» подгонки.

Для оптимального выбора подгоняемых элементов необходимо пользоваться функциями чувствительности, характеризующими влияние ППЭ на выходной параметр ГИМС. Так, в работе [44] определены относительные функции чувствительности выходного параметра двухзвеновой резистивной цепи по каждому из четырех резисторов. Они имеют следующий вид:

$$S_{R_1} = \frac{R_1(R_2 + R_3 + R_4)}{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_2(R_3 + R_4)},$$
$$S_{R_2} = 1 - \frac{R_2(R_1 + R_3 + R_4)}{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_2(R_3 + R_4)},$$

$$S_{R_3} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_2(R_3 + R_4)}$$

$$S_{R_4} = 1 - \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_2(R_3 + R_4)}$$

Для более сложных схем относительные функции чувствительности рекомендуется определять после составления графа схемы с помощью моделирующей установки. При определении оптимальной стратегии ФП в качестве критерия оптимальности можно выбрать минимальное время, затрачиваемое на активную подгонку. Стратегия ФП строится таким образом, чтобы при выбранном порядке изменения элементов подгонки выходной параметр ГИМС был выведен в заданную область значений в кратчайшее время.

Выбор начального допуска подгоняемых элементов практически не отличается от синтеза допусков РЭС. Однако, если подгонка сопротивления резисторов производится в сторону увеличения, то необходимо пересчитать номинальное сопротивление подгоняемого резистора по специальной методике.

В ряде случаев функциональная подгонка ГИМС может производиться за счет изменения емкости толстопленочных [42] или тонкопленочных конденсаторов [45, 46].

Такая подгонка должна быть автоматизированной [47, 48].

Функциональная подгонка ГИМС имеет следующие преимущества по сравнению с пассивной индивидуальной подгонкой:

1. Использование активных и пассивных элементов с менее жесткими допусками, что повышает выход годных ГИМС.
2. Исключение погрешностей, вносимых предыдущими технологическими операциями, в особенности высокотемпературными, такими как пайка, сварка.
3. Сокращение времени, затрачиваемого на подгонку (вместо нескольких резисторов подгоняется один).
4. Проведение функционального контроля одновременно с ФП, что значительно снижает затраты рабочего времени и уменьшает опасность повреждения ГИМС при транспортировке.

К недостаткам функциональной подгонки следует отнести:

1. Использование разнообразного измерительного оборудования для подгонки ГИМС различного назначения, затрудняющее ФП схем, изготавливаемых небольшими сериями.
2. Сложность транспортировки ГИМС в корпусах, так как подгоночные установки предназначены для работы с плоскими подложками и поэтому не могут быть использованы.

5.4. Пассивная подгонка резистивных элементов

Пассивная подгонка может быть подразделена на плавную и дискретную. Если «инструмент» подгонки воздействует непосредственно на резистивный слой, то подгонка называется плавной. При дискретной подгонке «инструмент» воздействует на специально сконструированные коммутационные элементы путем их разрушения [49]. Дискретная подгонка не влияет на стабильность резистора [50].

Для изготовления точных схем частного применения, в том числе прецизионных высокоомных ТПР и ТПК с высокой удельной емкостью, необходимы способы подгонки, которые должны обладать следующими свойствами:

- 1) обеспечивать высокую точность подгонки (0,001 - 0,1)%;
- 2) обеспечивать большой диапазон подгонки (50 – 100)%;
- 3) обеспечивать высокий процент выхода годных ТПЭ (95- 100)%;
- 4) вносить малое возмущающее воздействие в параметре ТПЭ;
- 5) возможность подгонки узких резисторов (20 -100 мкм) и ТПК с малой площадью перекрытия обкладок (1 мм²);
- 6) возможность подгонки ТПЭ без «извлечения их из схемы»;
- 7) высокая производительность;
- 8) низкая стоимость;
- 9) доступность.

Сравнение наиболее известных способов подгонки ТПР проведено в таблице 10 [51-90].

Из анализа основных свойств и параметров рассмотренных способов подгонки можно сделать вывод, что для изготовления прецизионных ТПР пригодны следующие: электроннолучевой, лазерный, электроэрозионный, факельный, уплотнения резистивного слоя и в некоторых случаях токовый. Однако ни один из указанных способов не удовлетворяет полностью сформулированным выше требованиям.

Электроннолучевая подгонка осуществляется в вакууме. Этот метод труднодоступен, сложен, требует дорогостоящего оборудования. Потому при изготовлении прецизионных элементов и схем частного применения на него ориентироваться пока нельзя.

Более доступен лазерный способ. Однако стоимость лазерных установок пока сравнительно высока. При лазерной подгонке, кроме того, возможно ухудшение стабильности ТПР, вследствие воздействия больших температур в зоне обработки. Токовый метод трудно использовать для подгонки высокоомных ТПР.

Таблица 10

Сравнительная оценка способов подгонки тонкопленочных резисторов

Метод подгонки	Точность, %	δR , %	Преимущества	Недостатки	Пригодность*
1	2	3	4	5	6
Механический а) сокращение	0,5	100	Недорогое оборудование	Подгонка вручную; низкая производительность; отсутствие воспроизводимости	Малопригоден
б) ПМТ-3	0,01-0,5	100	Простота оборудования	Трудность подгонки узких ТПР; снижение прочности подложки	Не всегда пригоден
в) фрезерование	0,1-1,0	30	Простота оборудования; высокая производительность	Ухудшение свойств резистора; низкая точность; невозможность подгонки резисторов малых размеров	Не пригоден
Абразивный	0,1-1,0	30	Высокая точность, возможность автоматизации, депевизна	Невозможность подгонки резисторов малых размеров; загрязнение схемы микрочастицами абразива	Малопригоден
Электронно-лучевой	0,01-0,1	100	Высокая точность; возможность автоматизации	Дорогое и сложное оборудование; необходимость подгонки в высоком вакууме	Пригоден

* - пригодность для изготовления прецизионных высокоомных ТПР.

Таблица 10. Продолжение

1	2	3	4	5	6
Лазерный	0,01-1,0	100	Высокая точность, производительность; возможна подгонка защищенных резисторов	Дорогое оборудование; трудность подгонки узких резисторов; влияет на стабильность свойств ТТР	Пригоден
Анодное окисление	0,1-1,0	30	Возможность автоматизации; возможность групповой подгонки	Ограниченная область применения; необходимость промывки резистора после подгонки	Мало-пригоден
Высоко-частотный коронный	1,0	30	Возможность увеличения и уменьшения сопротивления	Низкая точность; узкий диапазон подгонки; вносит помехи в схему	Не пригоден
Электро-эррозионный	0,01-1,0	100	Высокая точность, простота оборудования	Большая трудоемкость; сложность подгонки узких резисторов	Пригоден
Токовый	0,1-1,0	30	Возможность подгонки как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения сопротивления	Узкий диапазон изменения сопротивлений; трудность управления процессом подгонки; низкая воспроизводимость; необходимость «удалять» резистор из схемы	Не всегда пригоден

Таблица 10. Окончание

1	2	3	4	5	6
Термоотжиг	1+3	5-20	Возможна групповая подгонка; простое оборудование	Низкая точность; узкий диапазон подгонки	Не пригоден
Химический	1+5	30	Возможность изменять сопротивление как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения	Низкая точность; малая скорость подгонки	Не пригоден
Уплотнения резистивного слоя	0,01-0,1	100	Высокая точность, широкий диапазон подгонки, дешевое оборудование; простота реализации; возможна подгонка очень узких резисторов; высокая производительность, не надо «удалять» резистор из схемы	Трудность подгонки металлических резисторов, а также керметных с очень высокой плотностью резистивных слоев	Пригоден
Факельный	0,01-0,1	100	Высокая точность; возможность автоматизации; малое возмущающее воздействие на свойства резисторов	Вносит помехи в подгоняемую схему	Пригоден
Термоотжиг лучом лазера	1+3	50	Высокая производительность; возможность групповой подгонки	Низкая точность; дорогое оборудование	Не пригоден

Для подгонки в сторону увеличения сопротивления в настоящее время экономически более целесообразно, видимо, использование электроэрозионного и факельного способов, а в сторону уменьшения сопротивления – метода уплотнения резистивного слоя [91,92].

Весьма перспективным следует считать метод факельного разряда. Такая подгонка вносит малое возмущающее воздействие в параметры резисторов, т.к. температура воздуха в канале факельного разряда составляет всего 3500-4000⁰К. Умеренная температура в зоне подгонки благоприятно сказывается на свойствах ТПР. Источники тепла при такой подгонке сосредоточены в одном канале разряда, в отличие, например, от коронного разряда, когда источники тепла распределены по нескольким каналам. Это позволяет достигать высокой точности подгонки (~0,01%).

Для обеспечения высокого процента выхода годных прецизионных ТПР весьма эффективным должно быть применение комбинированной подгонки, сочетающей два способа – увеличения и уменьшения сопротивления резисторов. Например, лазерный и уплотнения резистивного слоя, факельный и уплотнения резистивного слоя, электроэрозионный и токовый и т.д.

Можно предположить, что наиболее эффективно сочетание факельного метода и метода уплотнения резистивного слоя. Однако, окончательный вывод о пригодности и эффективности такой подгонки для ТПР на основе различных резистивных материалов можно сделать после экспериментального исследования.

5.5. Подгонка пленочных конденсаторов

Подгонку пленочных конденсаторов можно произвести путем изменения площади верхней обкладки, толщины диэлектрика или ϵ диэлектрической пленки. Чаще всего подгонку осуществляют изменением площади верхней обкладки [93-98]. В этом случае подгонка осуществляется либо путем отсоединения (отрезанием, испарением, выжиганием) части обкладки или ее секции, либо присоединением к основному конденсатору секций, предусмотренных заранее в топологии [99].

Подгонка емкости ТПК путем изменения ϵ диэлектрической пленки или ее толщины возможно лишь для специальных конструкций конденсаторов, например, гребенчатых. В этом случае можно производить обработку пленки диэлектрика электрическим полем, электрохимическим путем или излучением с большой удельной плотностью энергии.

Для изменения площади перекрытия обкладок конденсатора первоначально использовали алмазный резец, с помощью которого

производили скрайбирование верхней обкладки ТПК. Однако такое механическое воздействие приводит к нарушению сплошности диэлектрической пленки, образованию в ней трещин. Через них происходит проникновение влаги, кислорода воздуха. Эти факторы снижают электрическую прочность и стабильность тонкопленочного конденсатора.

Лучшие параметры подгонки обеспечивает лазерный метод. При использовании лазерного излучения с наносекундными импульсами большой мощности в ряде случаев удается удалять материал верхней обкладки без нарушения слоя диэлектрика. При этом исключается также разрушающее тепловое воздействие и снижается вероятность коротких замыканий ТПК.

Для отделения части обкладки ТПК можно использовать электронный луч. Однако такая подгонка не отличается стабильностью луча, что отрицательно сказывается на параметрах конденсатора. Так незначительные колебания плотности электронного потока вызывают интенсивный нагрев не только конденсаторов, но и подложки, что может привести к ее разрушению. При этом неизбежно снижается электрическая прочность и стабильность ТПК.

В ряде случаев возможно изменить емкость ТПК методом анодного окисления диэлектрика за счет нагрева его верхней обкладки при пропускании через нее электрического тока или обдува поверхности МДМ-структуры струей горячей кислородосодержащей смеси.

Иногда подгонку пленочных конденсаторов можно произвести восстановлением металла из окисла диэлектрического слоя. Для этого часть верхней обкладки или соединительный элемент между основным ТПК и присоединяемой секцией формируется в виде тонкой пленки окисла, которая превращается при избыточном давлении водорода в пленку металла.

Подгонку можно произвести методом пробоя основного или дополнительного конденсатора. Однако, чаще используется электроискровая или электроконтактная подгонка. В этом случае между верхней обкладкой и подгоночным электродом прикладывается напряжение, достаточное для развития искрового разряда. Во втором случае производят контактирование подгоночного электрода с верхней обкладкой. В ряде случаев в процессе подгонки производят замыкание верхней и нижней обкладок.

Для подгонки пленочных конденсаторов может быть использована способность ряда металлов образовывать амальгамы с ртутью. В этом случае верхняя обкладка или соединительный проводник между основным ТПК и отсоединяемой секцией должны быть выполнены из амальгирующего металла.

Изменять емкость за счет толщины диэлектрического слоя очень сложно. В этом случае необходим технологический контакт с большей частью диэлектрика, а это при сформированной МДМ-структуре практически невозможно. Воздействие через торцевые поверхности диэлектрика является малоэффективным. На данном этапе нет технологии, которая могла бы обеспечить равномерное и контролируемое изменение толщины диэлектрического слоя для изготовленного конденсатора по всей площади перекрытия обкладок.

Известный метод анодирования позволяет скорее всего сформировать МДМ-структуры с повышенной точностью воспроизведения емкости, а не производить подгонку.

Подгонка тонкопленочных конденсаторов путем изменения диэлектрической проницаемости возможна только для гребенчатых структур.

Основные методы подгонки тонкопленочных конденсаторов по данным работ [93-110] представлены в таблице 11.

Для подгонки тонкопленочных конденсаторов, в том числе и прецизионных, в большей степени подходит лазерный и электроконтактный методы. Однако, окончательный вывод для конкретной конструкции ТПК, используемого диэлектрика и других факторов можно сделать после дополнительных экспериментальных исследований.

Обеспечение требуемой точности толстопленочных конденсаторов обычно производится лазерным и пескоструйными методами [42].

Таблица 11

Методы подгонки ТПК и их возможности

Метод подгонки	Допустимый диапазон подгонки, % для разных значений площади, см ²			Точность подгонки, %	Изменяемый параметр
	0,1...0,01	1...0,1	2...1		
Разрезание алмазным резцом	-(10...50)	-(5...70)	-(1...90)	±(1...2)	Площадь
Лазерная обработка	-(5...60)	-(1...70)	-(0,5...90)	±0,1	Площадь
Электроннолучевая обработка	-(1...60)	-(1...70)	-(0,2...90)	±0,1	Площадь
Анодирование	-	-(2...30)	-(1...50)	±(5...10)	Площадь, толщина диэлектр.

Таблица 11. Окончание

Метод подгонки	Допустимый диапазон подгонки, % для разных значений площади, см ²			Точность подгонки, %	Изменяемый параметр
	0,1...0,01	1...0,1	2...1		
Сухое анодирование при пропуске тока	-	-(50...60)	-(10...30)	±(5...10)	Площадь
Электроискровая обработка	-	-(1...10)	-(0,1...20)	±(0,1...5)	Площадь
Амальгамирование	-	-(10...90)	-(5...90)	±(10...20)	Площадь
Допыление диэлектрика на ТПК планарной конструкции	-	-	+(10...15)	±(2...3)	Диэлектрическая постоянная
Легирование диэлектрика в процессе напыления	-	-	±(10...20)	±(2...5)	Диэлектрическая постоянная
Восстановление металла из его оксида	-	±(2...30)	+(1...50)	±(1...10)	Площадь

6 ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КАЧЕСТВО МИКРОСБОРОК

6.1. Материаловедческие аспекты производства микросхем и микросборок

В последнее время появился ряд работ, доказывающих, что материаловедческий аспект микроэлектроники является решающим при

технологической реализации любого, пусть даже весьма совершенного, конструкторского или схемотехнического замысла. Авторами [111] показана глубокая и неразрывная связь технологического и материаловедческого аспекта. В работе показано, что для решения проблемы создания современных микроэлектронных приборов и устройств необходимо знать физико-химические обоснования технологических процессов и иметь ясное представление о явлениях, протекающих в пленочных элементах и материалов во время их эксплуатации.

Проблема материаловедения в области микроэлектроники определяется спецификой процессов микроминиатюризации, основанных на создании интегральных полупроводниковых, гибридных и пленочных микросхем, состоящих из многослойных систем типа металл-диэлектрик-металл (МДМ), металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), диэлектрик-резистив-проводник (ДРП), резистив-проводник (РП) и других.

Научные исследования и практические разработки в области тонких и толстых пленок по сравнению с «массивными» образцами выявили ряд специфических закономерностей, которые оказывают влияние на технологический процесс производства, качество и эксплуатационные параметры изготовленных микросхем. Установлено принципиальное отличие пленочного состояния от обычного «массивного». Например, для тонкопленочного состояния оно заключается в наличии размерных и субструктурных эффектов, требующих для своего понимания привлечения новейших представлений физики поверхности и тонких слоев. Они являются основными для тонкопленочных материалов, тогда как для «массивных» материалов эти явления практически не принимаются во внимание [111].

Научный аспект пленочного материаловедения определяется реализацией принципа, высказанного академиком П.Л. Капицей. Изучения веществ в предельных состояниях. Тонкие пленки как раз и представляют собой предельные состояния конденсированных сред, включая в качестве частного случая и массивное состояние. Реализация рассмотренного принципа в пленочном материаловедении дает возможность строить его на обширном фундаменте с использованием новых глубоких обобщений [112].

Многочисленные исследования последних лет выдвинули на передний план проблему физики и химии поверхности. Поверхность твердого тела, представляющая собой «обрыв» его объема, нарушает его симметрию и превращает поверхность и приповерхностный слой в особую неравновесную область.

Планарный принцип создания ИМС прежде всего использует исходное неравновесное состояние поверхности чистого вещества – подложки. В естественных условиях переход к более равновесному

состоянию сопровождается различными процессами: адсорбцией на поверхности газов, паров и жидкостей, окислением или образованием различных твердых пленок, проникновением в поверхностный слой и в объем подложки с помощью диффузии различных примесей и т.д. При длительном хранении или эксплуатации проявляется еще воздействие различных факторов: света, тепла, магнитных и электрических полей, космических излучений и т.п., которые ускоряют или замедляют указанные процессы. Планарный принцип создания микросхем и микросборок предусматривает управляемое осуществление всех перечисленных выше процессов перехода из первоначального неравновесного состояния в состояние, близкое к термодинамическому равновесию.

В последние годы широкое распространение при изготовлении ИМС и МСБ получила толстопленочная технология. Толстые пленки занимают промежуточное состояние между тонкой пленкой и «массивным» материалом.

Свойства применяемых функциональных материалов и физико-химические взаимодействия между ними на различных этапах изготовления толстопленочных микросборок определяют характеристики получаемых изделий [113]. Поэтому изучение свойств материалов и всех особенностей, связанных с их применением, - очень важная задача при создании новых и совершенствовании традиционных технологических процессов толстопленочной микроэлектроники и систем управления качества.

6.2. Особенности тонкопленочных элементов

Пассивные тонкопленочные элементы, как правило, занимают более половины площади гибридных микросхем и микросборок и определяют их надежность. При этом качество и характеристики тонкопленочных элементов зависят в первую очередь от правильного выбора материалов и технологии их обработки. В связи с этим обоснованный выбор материалов для микросхем и микросборок является одной из важнейших проблем в тонкопленочной микроэлектронике.

Не менее важной проблемой является расширение диапазона номиналов пассивных элементов. Разработка достаточно стабильных и надежных тонкопленочных высокоомных резисторов и конденсаторов большой емкости будет способствовать дальнейшему развитию миниатюризации радиоэлектронных схем и устройств, особенно в приборостроении, в измерительной, связанной и другой радиоэлектронной аппаратуре. Поэтому разработка и исследование новых материалов, в том числе резистивных и диэлектрических, а также создание промышленной

технологии изготовления новых элементов микросхем становятся в настоящее время особенно актуальными.

Универсальность тонкопленочной технологии и возможность использования широкого класса материалов позволяют надеяться на успешное решение данной задачи вакуумными методами. На это сейчас направлены усилия многих исследователей в нашей стране и за рубежом. Результаты их работ частично опубликованы в периодической печати. Однако отсутствует обобщение и систематизация информации о тонкопленочных материалах, их свойствах и применению в микроэлектронике.

Особое внимание уделено высокоомным резистивным пленкам с удельным поверхностным сопротивлением более $10,0 \text{ кОм}/\square$ и диэлектрическим пленкам с повышенными значениями удельного сопротивления ($\rho_v = 10^{15} + 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и диэлектрической проницаемости ($\epsilon = 10 + 50$).

В последние годы определенные усилия в области создания как резисторов, так и конденсаторов направлены на исследование многокомпонентных и тутоплавких материалов, обладающих более высокими электрическими характеристиками, чем чистые металлы и "низкотемпературные" диэлектрики. Тем не менее, имеются сведения об улучшении параметров элементов на основе давно известных материалов путем совершенствования технологии их получения.

Приведены данные о новых материалах, пока еще не нашедших промышленного применения и находящихся в стадии исследования.

6.3. Материалы, технология и электрические характеристики тонкопленочных резисторов

Выбор материала для тонкопленочных резисторов обусловлен совместимостью технологического процесса создания пленочной микросхемы и заданными электрическими параметрами резистора, в частности: величиной сопротивления, стабильностью во времени, температурным коэффициентом сопротивления, номинальной мощностью рассеяния, спектром и уровнем шумов.

Материал, используемый для изготовления резистивных пленок, кроме того, должен обеспечивать: хорошую адгезию к подложке и другим слоям схемы, устойчивость к длительному и кратковременному воздействию высоких температур, высокую механическую прочность.

Тонкопленочные резисторы могут быть изготовлены из металлов, сплавов, полупроводников, смесей керамики с металлом и окислов.

В таблице 12 приведены некоторые материалы, используемые в вакуумной технологии для получения резистивных пленок, а также

показаны основные электрические характеристики резисторов по данным работ [114-155].

Чистые металлы для изготовления высокоомных резисторов, как правило, не используют, так как для обеспечения большой величины сопротивления металлическая пленка должна быть настолько тонкой, что утрачивает стабильность из-за островной структуры и активного воздействия атмосферы, например, из-за окисления [117]. Чисто металлические пленки с большим удельным сопротивлением обычно нестабильны. Тем не менее, из некоторых металлов и их сплавов можно изготовить достаточно стабильные высокоомные резисторы путем образования окислов, нитридов и других соединений в процессе нанесения пленки, либо при последующей химической обработке.

Для изготовления сверхвысокоомных резисторов используют материалы на основе нитридов и карбидов некоторых металлов, например, тантала; ряд окислов, легированных специальными добавками, например, окись олова с сурьмой и цинком; а также некоторые однородные окислы. Однако большинство однородных окислов металлов не нашло широкого применения в производстве тонкопленочных резисторов, так как тонкие диэлектрические пленки обладают очень высоким удельным сопротивлением (порядка 10^{10} – 10^{12} Ом·см), а более толстые – разрушаются вследствие появления больших механических напряжений в пленке.

В последние годы в промышленности с успехом используют для получения резисторов в широком диапазоне сопротивлений такие многокомпонентные материалы, как K20С, K50С, РС-3001, РС-1004, МШ и другие металлосилицидные сплавы (см табл.12). Хорошие результаты при изготовлении достаточно стабильных высокоомных резисторов ($\rho \geq 1,0$ кОм) могут быть получены на основе смеси чистых металлов и окислов (керметов).

Таблица 12

Материалы и основные электрические характеристики тонкопленочных резисторов

Материал резистора	Удельное поверхностное сопротивление, Ом/Г	$TKC \times 10^3$ 1/°C (20–100°C)	$\Delta R/R$, % за 1000 часов	Мощность рассеяния, Вт/см ²	Литература
1	2	3	4	5	6
Металлы					
Алюминий	2–10	20–350	–	–	117,118

Таблица 12. Продолжение

1	2	3	4	5	6
Висмут	3-5	-	-	-	118
Золото	5-10	300	±5	-	119,120
Цирко- ний	10-20	200	-	-	119,120
Плати- на	10-30	300	±3	-	119,120
Палла- дий	20-30	200	±5	-	119,120
Титан	50-100	±70	±2	1	119,120
	20-3·10 ³	±380	-	-	119,120
Никель	10-300	±25	-	0,5	119,120
Ниобий	50-10 ³	40-200	-	-	117,118
Хром	20-300	±5-50	±0,5	2	119,120
	30-150	±25	±0,2	1	122
Вольф- рам	100-200	0-125	-	1	119
	100-10 ⁴	±50	±5	1	119
Рений	30-10 ³	±0-20	±0,1	2	121-123
	100-10 ⁴	1-20	±0,2	-	121-123
Молиб- ден	200-10 ³	40-400	-	2	119,120
Тантал	5-20	±25	±2	2	123
	30-10 ⁴	±20-200	±0,5	3	123
Угле- род	10 ³ -10 ⁴	±150	-	-	124

Таблица 12. Продолжение

1	2	3	4	5	6
Сплавы					
Хром-золото	5-20	±20	-	-	125
Хром-алюминий	4-30	±30	±0,5	0,5	126
Сплавы МЛТ	200-500	±5-20	0,2-0,4	2	127
Железо-хром	20-135	±20-80	-	-	115
Никель-ванадий					
Хром-титан	10^2-10^3	±10	-	-	124
Хром-ванадий	10^2-10^3	±50	-	-	124
Тантал-хром	10^2-10^3	80	-	-	128,129
Никель-хром	500- 10^3	-	-	-	119,120
	10-200	±35	±0,1	0,5	124
Борид циркония	10^3	-	-	-	130
Нитрид-тантал-титан	10^3-10^4	±4,4-80	-	-	131
Никель-кобальт	50- $2 \cdot 10^3$	±50	±0,5	1,0	115,132
Никель-бериллий	10^2-10^4	±(10-50)	-	-	133
Хром-никель-железо	10^2-10^5	1000	-	-	134
Сплав К-50С	10^2-10^5	-	-	-	-

Таблица 12. Продолжение

1	2	3	4	5	6
Металлокерамические смеси					
Тантал- золото- кварц	10^2-10^5	± 1000	-	-	135
Хром- моноокись кремния	10^2-10^3	$\pm(5-10)$	± 1	2	115
	10^3-10^4	$\pm(10-100)$	± 2	2	115
Золото- моноокись кремния	10^2-10^4	-	-	-	136
Хром- моноокись кремния- ситалл	10^3-10^5	± 50	± 2	2	137
Кремний- лантан- моноокись кремния	10^3-10^4	± 40	-	-	119
Железо- моноокись кремния	10^3-10^5	$\pm(10-40)$	± 3	2	115,131
Железо- окись вольфрама	—	—	—	—	115,131
Хром- окись вольфрама	—	—	—	—	115,131
Алюми- ний-окись кремния	10^3-10^4	± 30	-	-	115,131
—	10^4-10^5	$\pm(50-100)$	-	-	115,131
Алюми- ний-окись алюминия	10^2-10^4	± 75	-	-	115,131

Таблица 12 Продолжение

1	2	3	4	5	6
Золото- окись тантала	10^2-10^5	± 85	-	-	115,131
Платина- окись тантала	10^3	± 25	-	-	115,131
Молиб- ден-окись кремния	10^2-10^3	1-10	-	-	138
Платина- моноокись кремния	10^2-10^3	-	-	-	131
Платина- моноокись вольфрама	10^2-10^3	± 30	-	-	132
Нихром- окись кремния	10^3	± 50	-	-	124
—	10^2-10^6	± 150	-	-	124
Серебро- окись серебра	10^2-10^4	-	-	-	139
Хром- окись лантаноид- ла	10^3-10^5	5-10	± 3	2	140,141
Металло-цилиндричные сплавы					
Кремний- хром- никель	10^2-10^3	-20, +40	-	-	115,142, 143
Крем- ний-хром	10^3-10^4	5-20	-	-	115,119, 144
Сплав $CrSi_2$	10^2-10^4	5-25	-	-	115,123
Кремний- хром- вольфрам	10^2-10^3	100	0,1	2	145

Таблица 12 Окончание

1	2	3	4	5	6
Кремний-лантаноид	10^3-10^5	5	0,5	-	119
Алюминий-кремний	10^2-10^4	± 30	-	-	115
Кремний-вольфрам	10^3-10^4	± 150	-	2	115
Кремний-тантал	10^3-10^4	± 100	-	-	147
Оксидные и другие соединения					
Оксид олова	$10^2-5 \cdot 10^4$	-	-	-	115, 119, 120, 148
Оксид титана	10^4-10^5	-	-	-	149
Оксид или нитрид тантала	10^3-10^5	$\pm(10-10^3)$	-	-	119, 120, 150
Карбид тантала	10^3-10^4	$\pm(50-10^3)$	-	-	151
Оксид олова с добавками	10^3-10^5	-	-	-	148
Оксид индия	10^3-10^2	-	-	-	148

Резистивные пленки с r_s до 300 Ом можно получить на основе хрома, который обладает сравнительно высоким удельным сопротивлением ($19 \cdot 10^{-3}$ Ом·см). Хром легко сублимирует в вакууме при температуре порядка 1200°C . При этом образуются пленки, чистота и свойства которых сильно зависят от скорости нанесения, атмосферы остаточных газов и температуры подложки. Регулируя условия конденсации пленок хрома в процессе нанесения, можно обеспечить достаточно большое удельное сопротивление и малую величину ТКС. Так, например, азотированные путем нагрева в атмосфере аммиака пленки хрома обладали сопротивлением от 50 до 4000 Ом.

Для получения "высокотемпературных" резисторов используют ряд

тугоплавких металлов, таких, как Ta, W, Re, Ti, Nb, Mo. В зависимости от метода испарения и последующей обработки пленок получают резисторы с ρ_s от 10^2 до 10^4 Ом.

Расширить диапазон значений ρ_s пленок можно путем термического разложения паров металлоорганических соединений (например, арсенкарбонила вольфрама, дибензолвольфрама, арсенкарбонила или гексакарбонила молибдена, триметилниобийдихлорида, дибензолхрома, карбонила хрома, бисбензолхрома, бисэтилбензолникеля и др.) в вакууме или инертной среде, а также с помощью легирования металлических пленок углеродом или кислородом. При этом ТКС пиролитических пленок несколько ниже, чем у напыленных в вакууме. В таблице 13 приведены некоторые характеристики металлопленочных резисторов, полученных разными методами [119, 120, 123].

Таблица 13
Электрические характеристики металлопленочных резисторов, полученных разными методами

Материал	Распыление		Разложение		Легирование (0,1%, С)	
	ρ_s , Ом	ТКС, $1/^\circ\text{C}$	ρ_s , Ом	ТКС, $1/^\circ\text{C}$	ρ_s , Ом	ТКС, $1/^\circ\text{C}$
Хром	10-300	$-(1-5) \cdot 10^{-4}$	8-500	$(0,2-2) \cdot 10^{-4}$	20-30	$-5 \cdot 10^{-3}$
Никель	10-100	$-(3-5) \cdot 10^{-3}$	10-150	$-3,5 \cdot 10^{-4}$	6-15	$-(4,5-7) \cdot 10^{-3}$
Нихром	40-500	$-(1-2) \cdot 10^{-4}$	25-2700	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	-	-
Рений	$200 \cdot 10^{-4}$	$-(0,1-2) \cdot 10^{-4}$	-	-	-	-
Ниобий	$50 \cdot 10^{-3}$	$(4-20) \cdot 10^{-4}$	-	-	24	$-(4-7) \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	$100 \cdot 5 \cdot 10^3$	$(0,5-5) \cdot 10^{-4}$	$200 \cdot 10^4$	$-(0,2-5) \cdot 10^{-4}$	42-48	$-(3,5-5) \cdot 10^{-3}$
Молибден	$100 \cdot 10^3$	$(1-5) \cdot 10^{-4}$	$200 \cdot 5 \cdot 10^3$	$\pm(0,5-5) \cdot 10^{-4}$	45	$(3,6-4,2) \cdot 10^{-3}$
Тантал	$100 \cdot 10^4$	$\pm(0,5-3) \cdot 10^{-4}$	$200 \cdot 2 \cdot 10^4$	$\pm(0,6-5) \cdot 10^{-4}$	-	-
Титан	$100 \cdot 2 \cdot 10^4$	$(1-8) \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 3 \cdot 10^3$	$\pm(0,7-8) \cdot 10^{-4}$	-	-

Пленочные резисторы из керметных материалов, содержащих проводящую и диэлектрическую фазы, могут быть получены следующими методами [115]:

- совместным осаждением частиц проводящей и диэлектрической фаз;
 - образованием диэлектрической фазы частичным окислением проводящей фазы;
 - образованием проводящей фазы частичным восстановлением диэлектрика;
 - внедрением в пленку, состоящую из одной фазы, частиц другой фазы.
- В зависимости от соотношения концентраций указанных

компонентов можно получать пленки в виде матрицы из диэлектрика, в которой диспергированы частицы проводящего материала, либо проводящую микрокомпозицию, в которой диспергирована диэлектрическая фаза. В результате этого керметные пленки имеют широкий диапазон удельных сопротивлений и ТКС, который может быть как положительным, так и отрицательным.

Наилучшие результаты при изготовлении высокоомных резисторов получены на основе кермета Cr-SiO₂ /115/, позволяющего получать достаточно стабильные пленки с ρ_s до 10 кОм. Более высокое сопротивление можно получить на основе систем Pt-Ta₂O₅, Au-WO₃, Au-Ta₂O₅, Ta-Al₂O₃. Однако стабильность таких пленок хуже, чем Cr-SiO₂.

Керметные пленки с ρ_s до 100 кОм можно получать на основе Cr-Nd₂O₃ или Cr-NdAlO₃, взятых в разном соотношении компонентов [152]. Образование высокоомных пленок способствует мелкодисперсная структура, получаемая в результате модифицирования (измельчения) хрома в присутствии редкоземельных компонентов [153], что позволяет получать сплошную пленку при сравнительно малой критической толщине.

В работе [154] получены пленочные резисторы номиналом до 10 МОм на основе пленок Cr-Nd₂O₃ с $\rho_s = 30$ кОм. Высокоомные резисторы с малым ЭДС шумов получены авторами работы [155] на основе кермета метатлосилицид и окись лантана.

Были исследованы и другие материалы с целью применения в качестве тонкопленочных сопротивлений. Важнейшие полупроводниковые материалы, например, чистые кремний и германий, не нашли применения вследствие технологических трудностей при напылении и ограниченного диапазона температур, в пределах которого ТКС резисторов остается незначительным и приблизительно постоянным. Методы напыления сложных полупроводниковых соединений еще достаточно не отработаны, чтобы их можно было использовать в производственных условиях для получения резисторов с малыми допусками.

6.4. Материалы и электрофизические свойства тонких диэлектрических пленок и емкостных элементов

Основные электрические характеристики тонкопленочных конденсаторов: емкость, электрическая прочность, тангенс угла диэлектрических потерь — определяются в основном материалом диэлектрика и технологией его напыления.

Материалы, используемые для изготовления диэлектрических пленок конденсаторов, должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь величину диэлектрической проницаемости, необходимую для получения требуемой емкости при достаточном рабочем напряжении;
- не разлагаться при испарении и осаждении;
- обеспечивать хорошее сцепление с диэлектрической подложкой и металлом;
- обладать высокой механической прочностью и химической инертностью;
- обладать высокой электрической прочностью и малыми диэлектрическими потерями;
- иметь минимальную гигроскопичность и не растворяться в воде.

В качестве диэлектрика тонкопленочных конденсаторов с небольшой удельной емкостью (до $0,05 \text{ мкФ/см}^2$) исследованы материалы, приведенные в таблице 14 [116, 119, 120, 123, 124, 156-170].

Самым распространенным материалом, используемым в промышленности в качестве диэлектрика конденсаторов, является монооксид кремния (SiO). Диэлектрическая постоянная пленок SiO изменяется в широком интервале величин (от 3 до 8). Выяснено, что состав диэлектрических пленок изменяется в пределах от SiO до SiO_2 и трудно поддается регулированию. Отношение содержания Si к содержанию O_2 зависит от диссоциации исходных материалов и от рекомбинации продуктов диссоциации с остаточными газами на поверхности подложки.

В 1966 г. в Советском Союзе было предложено использовать в качестве диэлектрика пленочных конденсаторов монооксид германия [163]. Положение GeO в таблице Менделеева дает основание надеяться, что по своим физико-химическим и электрическим свойствам GeO во многом сходна с SiO .

В то же время величина ϵ в два раза выше, чем у SiO , что позволяет получать большую удельную емкость конденсаторов. Более низкая температура испарения GeO ($700\text{--}800^\circ\text{C}$) по сравнению с SiO ($1100\text{--}1300^\circ\text{C}$) дает ряд технологических преимуществ: упрощает процесс напыления, снижает вероятность химического взаимодействия с материалом испарителя и загрязнения напыляемой пленки.

Таблица 14

Основные электрические характеристики тонкопленочных конденсаторов с малой удельной емкостью

Исходный материал	Метод и температура испарения	Диэлектрическая проницаемость	Удельная емкость, мкФ/см ²	Удельное сопротивление, Ом·см	Тангенс угла потерь	Электрическая прочность, В/см·10 ⁶	Примечание	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CaF ₂	Термическое испарение, 1400°C	3,2	—	—	0,05	—	Растворим в воде	119, 120, 123
MgF ₂	—	4,9–6,5	0,01	10 ⁹ –10 ¹¹	0,01	1–2	Зависимость от режимов напыления	124, 157, 158
Халькогениды (типа XI)	— 400°C	6	0,005–0,01	10 ¹⁰	0,01	0,8	Нестабильность	124, 157, 158
ZnS	— 1200°C	7–8	0,01–0,03	10 ¹⁰ –10 ¹²	0,02	—	Зависимость от режимов напыления	123, 158
Sb ₂ S ₃	— 550°C	18–20	0,01–0,05	10 ¹²	0,05–0,1	0,1–2	Низкая стабильность	123, 156, 158
Sb ₂ S ₃ +SiO ₂	—	10–11	0,015	—	0,001–0,005	0,5–1,5	—	157
Алюмосиликатное стекло SiO ₂ -Al ₂ O ₃	Пиролиз	4–4,5	до 0,02	10 ¹⁵	0,005–0,05	1–10	Удовлетворяет требованиям	156, 158

Таблица 14. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Алюмо-силикатное стекло С-41-1	Термическое вибродозирование	4,1-4,5	0,05-0,25	-	0,005-0,01	1-4	Удовлетворяет требованиям	156, 161, 166
(SiO ₂ · Al ₂ O ₃ · TiO ₂ · CaO · MgO)	Термическое испарение 1300°C	4-6	0,003-0,01	10 ¹² -10 ¹³	0,002-0,02	1-2	—"	116, 119, 120
SiO	—" 800°C	10-12	0,01-0,02	10 ¹² -10 ¹³	0,002-0,01	0,5-2	—"	163
GeO	—" 1000°C	-	0,01		0,005		—"	159, 160
Боросиликатные стекла (B ₂ O ₃ · SiO ₂)	Термическое испарение, пиролиз	4-5	0,01-0,05		0,001-0,03	2-4	Удовлетворяет требованиям	156, 161, 166
Al ₂ O ₃	Катодное распыление, анодирование, пиролиз	6-9	0,01-0,02	10 ¹⁴	0,008	1-8	Не технологичен	161, 168

Таблица 14. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	— " —	3-4	0,005 -0,01	10 ¹⁴	0,005	1-10	Удовлет- воряет требова- ниям	116, 161, 169
Иттрий- борат- ное стекло	—	12-14	0,01- 0,08		—	1-2	— " —	116, 161, 169
Si ₃ N ₄	Катод- ное распы- ление, аноди- рова- ние, пиро- лиз	5,5- 9,9	до 0,01		0,03	1-4	—	116
MgO	Катод- ное реак- тивное распы- ление	8	до 0,05		0,07	1-4	Не техноло- гичен	169
Y ₂ O ₃	Элект- ронно- луче- вое испа- рение	12-14	до 0,05	10 ¹⁴	0,001- 0,01	2-8	Не техноло- гичен	116, 170

Результаты исследований показали, что конденсаторы на основе SiO и GeO по своим свойствам примерно одинаковы, причем обнаруживают общие закономерности изменения свойств в зависимости от технологических режимов напыления [116,119,120,164]. Исключением при этом являются повышенная величина диэлектрической проницаемости пленок GeO по сравнению с SiO, что позволяет получать конденсаторы с удельной емкостью до 20000 пФ/см², а также более сильная зависимость свойств пленок GeO от воздействия влажной атмосферы.

Конденсаторы на основе GeO обладают достаточной временной и температурной стабильностью в диапазоне от 1 кГц до десятков МГц. Наряду с SiO монооксид германия находит широкое применение в микроэлектронике.

В последние годы нашли применение в качестве диэлектрических пленок конденсаторов и изолирующих слоев такие материалы, как SiO₂, Al₂O₃, Y₂O₃, боро- (B₂O₃·SiO₂) и алюмосиликатные стекла (Al₂O₃·SiO₂) [116,119,120,123,161,170].

Для получения диэлектрических пленок на основе данных материалов используются электронно-лучевое испарение, диодное высокочастотное распыление, ионно-плазменное высокочастотное распыление по трехэлектродной системе, а в ряде случаев — пиролитическое осаждение. Некоторые характеристики таких конденсаторов приведены в таблице 15.

Конденсаторы на основе пленок, полученных ионно-плазменным высокочастотным распылением, имеют наиболее высокий процент выхода годных, причем наивысший процент выхода годных наблюдается для конденсаторов на основе SiO₂ и Al₂O₃·SiO₂ [123,166].

Пиролитические конденсаторы на основе SiO₂ и Al₂O₃ обладают стабильными свойствами при толщине диэлектрика не менее 1000Å, что соответствует величине удельной емкости $\leq 0,04$ мкФ/см². Однако выход годных элементов невысок и сильно зависит от качества и технологии разложения органических соединений, материалов электродов.

Наиболее стабильные и надежные конденсаторы получают на пленках, толщиной более 0,2 мкм, при удельной емкости до 0,2 мкФ/см². Пробивное напряжение при этом составляет 50–100 В, ТКЕ=(200–600)·10⁻⁶ 1/°С в диапазоне +(20–120)°С, частотная стабильность параметров конденсаторов сохраняется в диапазоне 20Гц–1МГц.

Боро- и алюмосиликатные стекла позволяют получать более плотные пленки, имеющие малую пористость, высокое удельное сопротивление (не менее 10¹⁵ Ом·см), большую величину напряженности пробивного поля (до 10⁷ В/см). Свойства конденсаторов (C,tgδ) на основе таких пленок достаточно стабильны до 10МГц и до температуры 200°С. Испытания конденсаторов с удельной емкостью до 0,02 мкФ/см², проведенные под нагрузкой в течение 1000 ч. показали их высокую надежность.

Дальнейшее повышение удельных характеристик конденсаторов возможно путем использования материалов с более высоким значением диэлектрической проницаемости и высокими механическими, химическими и термодинамическими свойствами.

Таблица 15

Некоторые электрические характеристики тонкопленочных конденсаторов, полученных разными методами

Материал	Термическое			Диодное в.ч.			Трехэлектродное в.ч.			Пиролиз		
	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}} \cdot 10^6, \text{В/см}$	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}} \cdot 10^6, \text{В/см}$	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}} \cdot 10^6, \text{В/см}$	ϵ	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}} \cdot 10^6, \text{В/см}$
SiO_2	3,8-4	0,005	1-10	3-4	0,005	2-10	3-4	0,005	2-3	3,5-3,6	0,01	1,0
Al_2O_3	6-9	0,01	1-8	8,55	0,005	1-5	-	-	-	5-8	0,03	0,5
Y_2O_3	11-15	0,05	1-3	-	-	-	12-14	0,005	1-6	-	-	-
$\text{B}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	3-5	0,005	2-4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$	4-4,5	0,005	1-10	-	-	-	-	-	-	4-4,3	0,01	до 10

Основные электрофизические характеристики окислов можно связать с фундаментальным параметром — шириной запрещенной зоны E_g [165]. Рассмотрение этой связи показывает, что с увеличением ширины запрещенной зоны обычно наблюдается снижение величины ϵ .

Таким образом, для получения элементов с высокой удельной емкостью наибольший интерес представляют окислы, расположенные на кривой 2, обладающие большой величиной ϵ и достаточной термической устойчивостью. К ним относятся TeO_2 , Y_2O_3 (3а); TiO_2 , ZrO_2 , HfO_2 (4а); Nb_2O_5 , Ta_2O_5 (5а). Однако вакуумное получение тонких пленок на основе этих материалов представляет определенную трудность — перечисленные окислы относятся к наиболее тугоплавким. Задача получения данных пленок термическим испарением из резистивных нагревателей в вакууме осложняется в виду того, что при нагреве в вакууме происходит диссоциация окислов, образующиеся низшие окислы обычно обладают полуметаллическими свойствами.

Методами катодного реактивного распыления или анодного окисления получают достаточно стабильные и надежные конденсаторы на основе окиси тантала с удельной емкостью до $0,1 \text{ мкФ/см}^2$. Повышение величины удельной емкости за счет снижения толщины диэлектрической пленки Ta_2O_5 или использование диэлектриков с более высокой ϵ , например TiO_2 , Nb_2O_5 , ThO_2 , CeF_2 , ZrO_2 приводит к резкому уменьшению величины пробивного напряжения, увеличению $\text{tg} \delta$, ухудшению стабильности и снижению надежности конденсаторов.

Разработка и внедрение ионно-плазменного высококачественного метода в технологию распыления тугоплавких диэлектриков позволяет надеяться на то, что могут быть получены надежные конденсаторы с высокой удельной емкостью на основе тугоплавких материалов с повышенной величиной диэлектрической проницаемости [123,171-176]. Так например, данным методом в лабораторных условиях получены плотные мелкодисперсные аморфные пленки на основе редкоземельных боровитрикатов и других соединений металлатного типа [175,176]. Удельная емкость таких тонкопленочных конденсаторов достигает $0,2 \text{ мкФ/см}^2$ при рабочем напряжении 10-15В, тангенс угла потерь равен 0,002-0,01, ТКЕ составляет $(100-800) \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ в диапазоне $+(20-100)^\circ\text{C}$. Однако надежность данных конденсаторов еще не исследована.

Применение сегнетозлектрических пленок пока ограничено плохой воспроизводимостью и низкими характеристиками конденсаторов: электрическая прочность 10^5-10^4 В/см , тангенс угла потерь — 0,02-0,1, температурный коэффициент емкости $10^{-7} \text{ } 1^\circ\text{C}$ [156-158]. Основные электрические характеристики тонкопленочных конденсаторов с повышенной удельной емкостью на основе тугоплавких диэлектриков приведены в таблице 16.

6.5. Материалы толстопленочных элементов

В гибридных интегральных микросхемах и микросборках широко

применяют толсто пленочные резистивные и другие элементы с учетом разновидности их параметров. Обработка толсто пленочной технологии связана с необходимостью комплексного решения широкого круга материаловедческих, инженерных, технологических, экономических и других задач. Особенно важным является выбор исходного резистивного материала или композиции материалов и метода получения пленки заданного состава и строения, которые и определяют функциональные возможности электронных узлов.

Таблица 16

Основные электрические характеристики тонкопленочных конденсаторов с повышенной удельной емкостью на основе тугоплавких диэлектриков

Исходный материал	Метод и температура испарения	ϵ	$C_{уд}$, мкФ/см ²	ρ , Ом·см	$E_{пр} \cdot 10^6$, В/см	$tg\delta$	Примечание	Литература
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ThO ₂ , Nb ₂ O ₅ , MoO ₃ , WO ₃ , V ₂ O ₃	Реактивное катодное распыление, электролитическое анодирование	10-50	0,1	10^{10} - 10^{13}	1-5	0,01	Не технологичен	177, 179
TiO ₂	Реактивное распыление, анодное окисление	20-55	0,3	-	1,0	0,04	Не технологичен	169, 180
Ta ₂ O ₅	Катодное распыление 2000°C, анодное окисление	16-25	до 0,1	10^{12} - 10^{15}	1-5	0,003- 0,01	Удовлетворяет	115, 120, 125
CeF ₂	Гермическое испарение	30	до 0,2	-	0,05- -0,1	0,1- 0,5	Низкая стабильность	156- 158

Таблица 16. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оксиды РЗМ: Nd_2O_3 , Dy_2O_3 и др.	Электронно-лучевое испарение (1600–2000°C)	12–22	0,01–0,1	10^{10} – 10^{14}	1–8	0,002–0,1	Диссоциирует, не технологичен	116, 119, 120, 121, 171, 174
Lu_2O_3	Катодное реактивное	–	0,05	–	–	–	Диссоциирует, не технологичен	
HfO_2	Катодное реактивное	16	0,01	10^{14} – 10^{15}	2–3	0,01	Диссоциирует, не технологичен	
Соединения металлатного типа	Электронно-лучевое (1600–2000°C), ионно-плазменное высокочастотное	10–20	0,05–0,2	10^{12} – 10^{16}	1–8	0,002–0,01	–	173 – 176
$NdAlO_3$, $YScO_3$, Ho_2 , Zr_2O_3 , $NdScO_2$ и др.								
ZrO_2	Реактивное катодное, анодирование	20–22	0,05–0,1	–	1–4	0,005–0,1	Не технологичен	123

Таблица 16. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9
SrTiO_3	Термическое	13–20	до 0,1	10^{10} – 10^{12}	1,0	0,02–0,1	Низкая стабильность	
BaTiO_3 , BaScTiO_3	Термическое, взрывное	до 1000	–	–	0,1	0,05	Низкая стабильность	

В связи с этим актуальным является направление, включающее анализ известных и получение новых паст для толстопленочной технологии, исследование физико-химических явлений, протекающих в процессе формирования резистивных элементов. Для изготовления толстопленочных резисторов используют в настоящее время большое количество резистивных материалов, освоены методы нанесения паст на подложку, технологические процессы получения пленок, их подгонки. Эксплуатационные параметры толстопленочных резисторов постоянно улучшаются, предлагаются новые сочетания элементов, составляющих пасту. Несмотря на многообразие применяемых материалов, ни один из них пока не обеспечивает перекрытие широкого диапазона номиналов сопротивлений при одновременном сохранении других необходимых параметров. Прогнозирование электрофизических характеристик элементов и целенаправленная их практическая реализация могут быть эффективны при решении таких вопросов толстопленочной технологии:

- обобщение и систематизация информации о фазовом составе и фазовых переходах в используемых многокомпонентных системах;
- нахождение зависимости между составом паст (с учетом данных по термодинамическим, кристаллоструктурным, физическим свойствам индивидуальных веществ и твердых растворов) и электрическими свойствами полученных пленок;
- определение корреляции между условиями обработки паст и характеристиками слоев;
- выбор оптимальных вариантов количественного состава паст при заданном качественном составе;
- оптимизация операций трафаретной печати;
- выбор условий вжигания пасты в керамику.

В литературе описываются конструктивно-технологические основы толсто пленочных интегральных микросхем, материалы подложек, различные типы паст [118-190], предлагаются способы контроля содержания основных компонентов и примесей, приводятся данные изменения параметров резисторов в зависимости от температуры и времени вжигания [191-193].

Прогресс в области применения толсто пленочных схем заставляет предъявлять повышенные требования к пастам. Они должны обеспечивать возможность получения толсто пленочных резисторов с определенным диапазоном номиналов сопротивлений, имеющих малые значения ТКС, стабильных при хранении и эксплуатации в широком температурном интервале и агрессивных средах, совместимых с проводниковыми и диэлектрическими системами, кроме этого обладать заданными реологическими свойствами и способностью создавать высокую адгезию пленки с подложкой. Немаловажными являются технологичность процессов изготовления паст и пленок из них, а также экономические факторы. С учетом данных требований и формируется состав пасты. Паста представляет собой сложную композицию, основными компонентами которой являются мелкодисперсные порошки металлов или их оксидов, стеклообразующие оксиды и органические вещества связки.

Функциональная составляющая (металлы и оксиды металлов) определяют величину сопротивления резистора и другие параметры. Стеклофаза является матрицей, в которой распределены частицы проводящей фазы, одновременно она обеспечивает адгезию пленки к подложке. Органические вещества предназначены для придания композиции определенных реологических свойств. Из многочисленных и многообразных факторов, определяющих электрофизические параметры толсто пленочных резисторов, рассмотрим роль состава резистивной композиции. В литературе приводятся данные о применении в качестве проводящей фазы резисторов около сорока химических элементов. По группам периодической таблицы Д.И. Менделеева они распределяются следующим образом: Cu, Ag, Au (I гр.), Ca, Sr, Ba, Zn, Cd (II гр.), Y, Jn, La, Sm, Yb, Lu, Tl (III гр.), Ti, Zr, Sn, Pb, (IV гр.), V, Nb, Sb, Ta, Bi (V гр.), Cr, Mo, W (VI гр.), Mn (VII гр.), Co, Ni, Ru, Pd, Ir, Pt (VIII гр.). Часть из них нашли широкое применение, другие используются как модифицирующие добавки или предлагаются в качестве новых резистивных материалов. Чрезвычайно редко в роли функциональной фазы выступает один компонент, например, серебро или платина, рутений или палладий [194]. Такие системы имеют общий недостаток - большую чувствительность к изменению количества металла: при содержании 48% серебра пленка имеет $\rho_s = 1 \text{ Ом}/\square$, при 46% серебра - $\rho_s = 1 \cdot 10^5 \text{ Ом}/\square$ [182]. Традиционной стала разработка новых составов паст

на основе нескольких компонентов. Определяется это тем, что если исходная фаза представляет собой кристаллическую систему, например, твердый раствор, который сохраняет однородность при варьировании количественного соотношения составляющих, то изменение концентрации одного из них на стадии синтеза будет приводить к более тонкому управлению электрофизическими параметрами пленки. Основной класс исходных веществ – оксиды [185,195-210], иногда в композицию из оксидов включают металлы: серебро, платину, палладий, вольфрам, марганец [211-216], бориды, карбиды, силициды [190,217-223].

Причиной использования именно оксидных материалов являются их уникальные свойства: химическая инертность, достаточно высокая термо- и влагостойкость, определенный тип проводимости. Особенности структур оксидов допускают оба типа проводимости: *n*-типа и *p*-типа. Так, TiO_2 обладает электронной проводимостью, причем основной вклад в общую электропроводность оксида вносят межузельные ионы титана. Такую же *n*-типа проводимость имеют оксиды: ZnO , CdO , Bi_2O_3 , SnO_2 , Nb_2O_5 , V_2O_5 , WO_3 . Оксид никеля проявляет дырочную проводимость, что связано с наличием вакансий в катионных подрешетках и образованием эквивалентного количества дырок. Кроме NiO *p*-тип проводимости характерен для оксидов: SrO , CoO , PbO , Sc_2O_3 , Nd_2O_3 , La_2O_3 , Sm_2O_3 , ZrO_2 , Ag_2O , PbO . Следует учитывать, что некоторые оксиды: MgO , Al_2O_3 , Mn_3O_4 , Co_3O_4 имеют амфотерный характер проводимости, т.е. *n*-типа, либо *p*-типа в зависимости от температуры, давления кислорода, наличия примесей. Электропроводностью оксидов можно управлять легированием, вводя примесные ионы с зарядом, отличающимся от величины заряда основного замещаемого иона. Кроме того, в процессе термической обработки пасты оксиды взаимодействуют между собой с образованием солей: танталатов, ниобатов, рутенатов, станнатов, алюминатов, цирконатов, кобальтатов. Электропроводность этих соединений можно изменять также введением примесей или используя термообработку в различных условиях: в атмосфере воздуха, водорода или азота, в окислительной среде [224,225].

Известно, что одни из первых резистивных паст создавались на основе палладия или системы палладий–серебро [181,182,185]. Порошок металлического палладия получали восстановлением его комплексных соединений, например, $[Pd(NH_3)_2Cl_2]$, мелкодисперсное серебро – при взаимодействии оксида Ag_2O с гидрохиноном. В работе [184] отмечается важность выбора восстановителя, который эффективно влияет на форму и размер частиц металла, обсуждаются оптимальные размеры частиц Ag и Pd . Использование палладия, как проводящей фазы, представляет определенные трудности, связанные с его физико-химическими особенностями.

Палладий окисляется с поверхности при нагревании на воздухе при 800°C , а уже при 820°C начинается разложение оксида, образуется смесь Pd и PdO в различных соотношениях. При температуре выше 870°C оксид палладия полностью диссоциирует [226]. Температура разложения может существенно понижаться в присутствии других металлов [184]. Указанные температуры находятся в интервале, обычно применяемом для вжигания паст, поэтому процесс $\text{Pd} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{PdO}$ оказывается неконтролируемым. Характерным свойством палладия является его способность адсорбировать водород. В форме порошка палладий может поглощать объем водорода в 900 раз превышающий собственный объем металла. В то же время происходит уменьшение электропроводности и магнитной восприимчивости. В [227] высказано предположение, что при взаимодействии между водородом и палладием образуются химические структурные единицы Pd-H или Pd-H⁻, которые можно было бы рассматривать как равное число атомов или ионов серебра, поскольку единица Pd-H изoeлектронна атому серебра. Подтверждение находится в том, что растворимость водорода в палладиево-серебряных сплавах более или менее линейно уменьшается с увеличением содержания серебра. Эта гипотеза вызывает сомнения, т.к. не согласуется с известными свойствами серебра, которое с водородом не взаимодействует.

Осложнения вызывает и то, что оксид серебра разлагается в области температур $150-300^{\circ}\text{C}$ [228], а сплавы Ag-Pd образуют непрерывный ряд твердых растворов, которые трудно поддаются окислению [229]. Тем не менее, палладий в виде порошка металла или оксида, палладиево-серебряного сплава в сочетании с другими компонентами применяется до сих пор благодаря высоким электрофизическим характеристикам. С целью расширения диапазона применения резисторов в низкоомной области предлагается /211/ к материалу, включающему Pd, Ag₂O, In₂O₃, добавлять Ag и Bi₂O₃, причем благородные металлы составляют здесь значительную долю: Pd до 18%, Ag -44%, Ag₂O -18%. Порошок металлического палладия в количестве от 7,5 до 25% вводится в пасту, содержащую платину, для снижения ТКС до значений $(0,92-1,02) \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, вжигание проводится в интервале относительно высоких температур $1050-1150^{\circ}\text{C}$ [212]. Порошок металлического палладия в количестве от 7,5 до 25% вводится в пасту, содержащую платину, для снижения ТКС до значений $(0,92-1,02) \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, вжигание проводится в интервале относительно высоких температур $1050-1150^{\circ}\text{C}$ [212]. Согласно [213,230] модифицирующими добавками к пасте на основе системы Pd-Ag₂O могут служить танталаты марганца, кобальта, меди, никеля, а также кислый или средний ортофосфат иттербия.

На базе этих композиций при соответствующей термообработке (температура вжигания составляет 795°C) можно получить резистивные пленки с высокой стабильностью удельного сопротивления и ТКС в

пределах от $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$.

В работе [193] проведены исследования изменения стандартных потенциалов палладия и серебра в составе стекляннй фритты в зависимости от температуры и времени вжигания. Сделан вывод о необходимости направленного синтеза окисных пленок на поверхности частиц серебра и палладия. В перечисленных работах отмечается, что содержание палладия может изменяться в пределах от 7 до 25%, оптимальное количество серебра – около 40%, в палладиево-серебряных сплавах соотношение Pd: Ag = 60 : 40, 9 : 22 и др., в качестве стеклофазы рекомендуется использовать стекло марки 297/2. 551 в количестве от 35 до 57%. Основу большого числа резисторных композиций составляет рутений, его оксид и рутенаты. Порошок рутения можно получить в кристаллическом или аморфном состоянии при восстановлении металла из растворов его солей. RuO_2 образуется при нагревании металлического рутения в токе кислорода или при разложении его комплексных соединений гидроксихлорида [227, 231].

Термохимия оксидов подробно рассмотрена в работе [232]. RuO_2 отличается высокой термоустойчивостью, что позволяет применять его при различных режимах вжигания паст. Обычно диоксид рутения содержит примесь Ru_2O_3 [227]. Считается, что компенсация недостатка кислорода при синтезе рутениевых паст и повышение стабильности может быть достигнуто добавлением оксида ниобия. Следует отметить, что механизм стабилизации в данном случае изучен еще недостаточно. Nb_2O_5 действительно отличается высокой термической стойкостью, диссоциация становится заметной только вблизи температуры плавления, т.е. при 1490°C , оксид может восстанавливаться до NbO_2 при $800\text{--}1200^\circ\text{C}$. По составу пятиокись ниобия гомогенна в пределах $\text{Nb}_2\text{O}_{4.78}\text{--}\text{Nb}_2\text{O}_5$, т.е. не обладает избытком кислорода [233]. Небольшие добавки оксидов иридия и родия несколько повышают стоимость пасты, но также придают ей повышенную стабильность [185].

Экспериментально установлено влияние размера частиц на величину температурного коэффициента сопротивления. Резистивные пленки с ТКС равным $(12\text{--}15) \cdot 10^{-4} \text{C}^{-1}$, обладающие линейной температурной зависимостью удельного сопротивления, получены на основе пасты с RuO_2 , размеры частиц которого составляли 0,06–0,08 мкм [194]. Оптимальный состав был найден при 47–53% от RuO_2 в свинцово-боросиликатном стекле, температура вжигания составляла $890\text{--}910^\circ\text{C}$. По данным [198] уменьшить температуру вжигания и повысить стабильность удельного сопротивления можно введением в композицию, содержащую 7,5–60% RuO_2 , 0,1–30,5% Nb_2O_5 , и 15–67,5% боросиликатного стекла, небольшой добавки от 0,1 до 1,5% цинко-свинцовоборатного стекла с температурой размягчения $380\text{--}400^\circ\text{C}$. В результате температура вжигания не превышает 870°C , разброс

ρ_8 толсто пленочного элемента составляет 19-25%, $\text{TKC} = \pm 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. В [199] показана возможность расширения диапазона рабочих температур и удельного сопротивления в низкоомной области с одновременным повышением временной и температурной стабильности удельного сопротивления при введении в качестве добавки металлического рутения в проводящую фазу из смеси оксидов рутения, меди, висмута. При температуре вжигания $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ получены толсто пленочные резисторы с низкими значениями TKC : $-0,85 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале температур от -180° до 20°C и $0,73 \cdot 10^{-6}$ при температурах от $+20$ до 200°C ; ρ_8 составляет около $5 \text{ Ом}/\square$. Стабильность параметров при повышенной влажности и TKC менее $\pm 1 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ обеспечивается частичной заменой RuO_2 на Jl_2O_3 [201], одновременно снижается стоимость резистивной пасты. В работах [203,207] предлагаются более сложные модифицирующие добавки. Основная цель – уменьшение TKC и улучшение стабильности достигается введением в состав композиции соединения общей формулы $(\text{La}_{0,35}\text{Ca}_{0,65})\text{Ce}_{0,3}\text{Mn}_{0,7}\text{O}_3$ или смеси оксидов меди $\text{Cu}_4\text{Ta}_6\text{O}_{19} \cdot \text{H}_2\text{O}$, никеля или оксидов марганца $\text{Mn}_4\text{Ta}_6\text{O}_{19} \cdot \text{H}_2\text{O}$ в различных степенях окисления, вольфрама, оксида родия. Экспериментально установлено, что при содержании вольфрама менее двух процентов или более 20% и соединений марганца менее 1,0% и более 10,0% TKC увеличивается, а стабильность снижается. Авторы [214] предполагают, что эти изменения вызваны образованием нестабильных соединений, обладающих металлическим типом проводимости. В приготовлении этих паст используют, как правило, свинцово-боросиликатное стекло. Для того, чтобы исключить возможные процессы взаимодействия проводящей фазы и стекла на стадии вжигания, проводят предварительное нагревание всей шихты в муфельной печи. При $900\text{-}990^\circ\text{C}$ в течение 0,5-1 часа происходит синтез рутенатов. Интересно, что те же самые добавки: $\text{Cu}_4\text{Ta}_6\text{O}_{19} \cdot \text{H}_2\text{O}$, Mn_4O_3 , RuO_2 предлагаются в целях повышения TKC и расширения диапазона удельного сопротивления в высокоомной области. При пиковой температуре $645\text{-}748^\circ\text{C}$ получают толсто пленочные резисторы с $\rho_8 = 1045 \pm 58 \text{ кОм}/\square$ и TKC до $559,6 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [204]. Управление этими параметрами достигается изменением порядка исходных веществ и количественных соотношений. Как уже отмечалось [214], при высокотемпературном обжиге RuO_2 взаимодействует с оксидами металлов с образованием рутенатов. Оказалось, что пленки на основе таких соединений, как рутенаты свинца, висмута обладают высокими электрофизическими характеристиками, хорошей воспроизводимостью от партии к партии, малой зависимостью удельного сопротивления резисторов от температуры и числа циклов вжигания. Для получения резистивных элементов с улучшенными характеристиками в пасты на основе рутенатов вводят оксиды меди, индия, вольфрама [185,201,234].

Синтез рутенатов осуществляется из смеси порошков исходных оксидов, например, RuO_2 и V_2O_5 , взятых в стехиометрических соотношениях. Смесь тщательно перегриается и подвергается высокотемпературному обжигу при 970°C . Полное завершение реакции образования рутената завершается через 24 часа [185]. Авторы работы [200] с целью расширения диапазона значений удельного сопротивления и снижения ТКС в состав резистивного материала на основе рутената свинца (от 35,3 до 43,0%) предлагают вводить небольшие (0,38–0,9%) добавки оксида циркония, оксида ванадия (0,2–2,25%), оксида сурьмы (0,38–0,9%). Вжигание происходит при $850\text{--}900^\circ\text{C}$. Толсто пленочные резисторы на этой основе обладают $\rho_s = 33000\text{--}220000 \text{ Ом}/\square$ при ТКС, равном $(125\text{--}150) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в температурном интервале $60\text{--}155^\circ\text{C}$. Задача повышения стабильности сопротивления при комплексном воздействии высокого напряжения и температуры, уменьшения коэффициента напряжения изделия решается при несколько иных соотношениях компонентов ZrO_2 , V_2O_5 , Sb_2O_5 , Pb_2RuO_6 в присутствии BaTiO_3 и оксидов щелочноземельных металлов. Следует отметить, что в работе уделяется особое внимание дисперсности исходных порошков мегатитаната бария, стеклофазы и функциональной составляющей. Рутенат свинца смешивают с оксидами сурьмы, ванадия, циркония, прокаливают при 900°C , измельчают до получения определенных значений удельной поверхности в пределах от 6000 до 9000 $\text{см}^2/\text{г}$. В [236] для легирования пасты на основе рутената свинца (34,58–40,95%) с добавками V_2O_5 (1,9–2,25%), Sb_2O_5 (0,31–0,45%), ZrO_2 (0,38–0,45%) используется редко применяемый с этой целью PbJ_2 , который плавится без разложения при 412°C . После обжига при $850\text{--}900^\circ\text{C}$ получается резистивный материал с широким диапазоном $\rho_s = 47000\text{--}470000 \text{ Ом}/\square$ при ТКС $= (-100\text{...}+125) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в области температур $60\text{...}+155^\circ\text{C}$. Описан [237] способ получения резистивной пленки, обеспечивающий ТКС $= (-48\text{...}+117) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и ρ_s от $1000 \text{ Ом}/\square$ до $1 \text{ МОм}/\square$, высокую стабильность. Результат достигается добавкой к рутенату висмута (11–39,5%) абнетината ниобия (1,2–8,1%). Видимо, эта соль с объемным анионом разлагаясь при нагревании дает высокодисперсную химически активную форму оксида ниобия, не исключается при этом возможность взаимодействия Nb_2O_5 с компонентами стекла с образованием ниобатов. В патентных описаниях США и Японии в последние годы появились примеры [210,215] использования композиций, содержащих небольшие количества RuO_2 (2,0–15%) и не менее 35% SiC , а также 0,2% RuO_2 и до 75% SnO_2 . Таким образом, функциональными составляющими рутениевых паст являются диоксид рутения, рутенаты свинца, висмута. Содержащие RuO_2 в пастах варьируется в широком интервале: от 0,2 до 60%. В качестве легирующих добавок предлагаются вольфрам, оксиды меди, кальция, стронция, бария, индия, лантана, циркония, ниобия, висмута, ванадия,

сурьмы, иридия, родия, кобальта, марганца, никеля, наконец, диодид свинца, абиегинат ниобия, карбид кремния. Диапазон номиналов и область применения таких рутениевых паст с учетом влияния дисперсности, условий термической обработки и сочетания с различными типами стекла чрезвычайно велики.

Доля стеклофазы в рутениевых пастах составляет от 20 до 80%, в основном это свинцово-боросиликатное стекло [185,194,199]. Предлагаются боросиликатное с добавкой цинко-свинцовоборатного [198], свинцово-алюмоборосиликатное [200], стекла серии Ru-16, Ru-31,34, №274 и т.д. [204,207,235], модифицированные оксидами Nb_2O_5 , CoO , MnO_2 и др. Электрофизические свойства оксидов индия, таллия, кадмия, сурьмы, олова, других элементов позволяют привлекать их в качестве основного составляющего или легирующего материала в резистивных композициях. Одно из преимуществ их применения – замена драгоценных металлов и снижение стоимости изделий. Пасты на основе оксида индия содержат до 97% In_2O_3 , 2–3% Sb_2O_5 ; 0,5–3% Nb_2O_5 . Шихту готовят из нитратов, сульфатов или непосредственно из оксидов [196,238], перетирают порошки на шаровой мельнице, прокаливают несколько часов при $950^{\circ}C$. Паста дает возможность получать толсто пленочные элементы с удельным поверхностным сопротивлением от 690 до $1100 \text{ кОм}/\square$ и ТКС от 2,6 до $7,3 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}C^{-1}$ в области температур 20– $125^{\circ}C$. В небольших количествах от 0,5 до 7% In_2O_3 может входить в состав пасты на основе серебро-палладий [211]. В монографии [185] отмечаются достоинства резисторов на основе In_2O_3 : они выдерживают воздействие повышенной температуры ($+125^{\circ}C$) и электрической нагрузки, причем ТКС не превышает $10 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}C^{-1}$, а $\rho_s = 5 \text{ МОм}/\square$. Здесь же указывается, что основной их недостаток заключается в сравнительно большом изменении параметров под воздействием влаги (до 5%), но есть возможность улучшить стабильность резисторов до $\pm 2\%$. Действительно, если при синтезе оксида индия из гидроксида [239] прогревание до постоянной массы вести при $850^{\circ}C$, то получают гигроскопичные образцы In_2O_3 . Необходимо заканчивать прокаливание при $1000^{\circ}C$ в течение 0,5–1 часа, т.к. высокотемпературная форма In_2O_3 в отличие от непрокаленной негигроскопична. В работе [201] предлагается в пасту на основе RuO_2 с целью снижения ТКС и увеличения стабильности при повышенной влажности вводить именно In_2O_3 . Порошки исходных оксидов тщательно смешивались, таблетировались и отжигались в муфельной печи при $950\text{--}900^{\circ}C$ в течение 0,5–10 часов. Стабильность параметров резисторов в условиях 98%-ной относительной влажности равнялась $\pm 1\%$, ТКС был менее $1 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}C^{-1}$, ρ_s от 1 до $20 \text{ МОм}/\square$. увеличивался выход годных элементов.

С целью снижения ТКС, повышения влагоустойчивости и

термостабильности предлагается резистивный материал из оксидов MoO_3 , ZnO , V_2O_3 , Al_2O_3 , V_2O_3 и бора [202]. В результате окислительно-восстановительных реакций создается проводящая фаза, включающая, вероятно, оксид молибдена (IV). Вжигание производится при $630\text{--}670^\circ\text{C}$ в течение 8-12 минут. Предлагаемый материал позволяет повысить надежность толсто пленочных резисторов. Так, уход номинальных значений сопротивлений после пяти термоциклов в пределах от -60°C до $+125^\circ\text{C}$ составляет не более 0,5%, после выдержки в условиях относительной влажности воздуха 98% при 40°C в течение 30 суток уход номиналов сопротивлений не превышает 1%. Температурный коэффициент резисторов с ρ_s от $100\ \text{Ом}/\square$ до $100\ \text{кОм}/\square$ в интервале температур от -60°C до 125°C не хуже $\pm 1 \cdot 10^{-4}\ \text{C}^{-1}$.

Резистивные композиции на основе оксида таллия [181,183,185,188] позволяют изготавливать резисторы с широким интервалом сопротивлений от 1 до 20 $\text{МОм}/\square$ при изменении содержания проводящей фазы от 25 до 85%. Вжигание рекомендуется проводить на воздухе при температуре не более 580°C , т.к. при дальнейшем повышении температуры Tl_2O_3 диссоциирует до Tl_2O . Согласно [239] безводный оксид таллия уже при 330°C имеет состав $\text{Tl}_2\text{O}_{2,8}$. Ограничения в применении этого оксида связаны с его токсичностью.

Перспективным представляется использование в качестве проводящей фазы резисторов некоторых карбидов, силицидов, и особенно боридов титана, циркония, хрома, молибдена, вольфрама, тантала, никеля, щелочноземельных и отдельных редкоземельных элементов. Эти соединения характеризуются высокими температурами плавления ($2000\text{--}3000^\circ\text{C}$), большой твердостью, устойчивостью к агрессивным средам, некоторые из них обладают значительной электропроводимостью [185,190,216,217,221-223,240].

Бориды BaB_6 , LaB_6 имеют одинаковый тип кристаллической структуры, близкие размеры периодов кристаллической решетки, образуют широкую область твердых растворов. Все составы этой системы обладают металлическим типом проводимости. Дифференциальный термический анализ, петрографические исследования позволили описать процесс окисления гексаборидов при нагревании на воздухе и фазовый состав продуктов, затем было проведено изучение зависимости электропроводности пленок от температуры и выбраны реальные условия термообработки паст [190,219]. Установлено, что резистивный материал на основе твердых растворов $\text{BaB}_6\text{--LaB}_6$ обладает меньшими значениями температурного коэффициента сопротивления, чем ТКС резисторов на основе отдельно взятых BaB_6 или LaB_6 , а также их механической смеси. Минимальное значение ТКС получено при молярной доле LaB_6 , равной 24%. В сочетании системы $\text{BaB}_6\text{--LaB}_6$ со стеклофазой.

компоненты которой : SiO_2 (25-30%), B_2O_3 (0-13%), Al_2O_3 (2-7%), Bi_2O_3 (15-30%), CdO (0-1%) получены резисторы с ТКС от $5 \cdot 10^{-5}$ до $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, ρ_s от 0,01 до 30 $\text{кОм}/\square$ и влагостойкостью не более 2%.

Резисторный материал, описанный в [214], включает TiC (12-20%), TiB_2 (3-5%), MoSi_2 (16-24%). Обжиг этих материалов необходимо вести в атмосфере водорода при 900-950 $^\circ\text{C}$. В таких условиях формируется резисторная пленка, ТКС которой может достигать значения $2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при $\rho_s = 1 \cdot 10^5 \text{ Ом}/\square$.

Интересен аспект применения борида молибдена в толсто пленочных резисторах на основе молибденосодержащих стекол [189,220]. Отличительным свойством резистивного материала с данным стеклосвязующим является то, что проводящая фаза в нем создается при окислении борида молибдена в процессе сложных взаимодействий с компонентами стекла и образованием молибдатов, боратов цинка и кадмия. По данным рентгенофазового анализа в результате термообработки борида молибдена в составе паст получают металлический молибден и

оксиды молибдена, в основном MoO_2 [241]. Обращает на себя внимание тот факт, что стекло в пасте является и связующим, и функциональным элементом наряду с боридом. Стекло системы $\text{MoO}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO-CdO-Al}_2\text{O}_3$ проявляет склонность к кристаллизации и стабилизирует систему, в которой сформировались непрерывные нити проводимости типа дендритных. Управляя фазовым составом этой композиции можно получить резисторы с ρ_s от 5 до 250 $\text{Ом}/\square$ и ТКС = $(-0,02 \div 11) \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

В таблице 17 приводятся некоторые примеры изменения составов паст и способов термообработки для целенаправленного получения резисторов с определенными электрофизическими параметрами.

Значительное влияние на электрофизические параметры резисторов оказывает состав стеклофазы и доля ее в резистивной композиции пасты. При создании толсто пленочных элементов с целью расширения функциональных возможностей резисторов наряду с модификацией проводящей фазы используют как промышленные образцы стекла, так и оригинальные составы. Из анализа литературы следует, что доля стеклофазы может составлять от 14 до 81%, в состав ее входят такие элементы, как Pb , Si , B , Al , Ca , Ba , Mg , Sr , Zn , Ti , Mo , Bi , Co , Sb , Ti , Pt , Zr , Cd и др. Основу представляют SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , PbO . Стекла с низкой температурой размягчения содержат значительный процент оксида свинца [196]: PbO - 74%; B_2O_3 - 15%; ZnO - 6%; SiO_2 - 4%; Bi_2O_3 - 1%. Температура размягчения его составляет 380-460 $^\circ\text{C}$. Стекла, включающие менее 70% тяжелых оксидов PbO и Bi_2O_3 , не обеспечивают требуемой плотности (около 5,5 $\text{г}/\text{см}^2$) и качественную печать, поэтому введение PbO менее 55% и Bi_2O_3 менее 5% неэффективно. При этом

отмечено повышение тугоплавкости стекла, что требует увеличения температуры вжигания выше 850°C.

Таблица 17

Значения параметров паст и средства их достижения

№ п/п	Цели изобретения	ТКС, °С ⁻¹	ρ _с , Ом/□	t _{вж.} , °С	Состав пасты		Литература
					Компоненты прототипа, %	Дополнительные компоненты, %	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Снижение значений ТКС, увеличение диапазона в низкоомной области	$(-1+6,7) \cdot 10^{-5}$	0,1-30,5	745±5	Ag ₂ O (14,9-19,6), Pd (9,9-13,0), M ₄ Ta ₆ O ₁₉ , где M=Mn, Co, Ni, Cu, стекло 279/2 (35,7-46,8), орган. (18,0-19,4)	YbPO ₄ , Yb(H ₂ PO ₄) ₃ (2,5-20,4)	230
2.	Снижение значений ТКС, повышение точности тензорезисторов при 1300-1400°C	$(0,92±1,82) \cdot 10^{-4}$	-	1050-1150	Pt (7,5-25), SiO ₂ (7,5-25), Al ₂ O ₃ (3-10), B ₂ O ₃ , BaO, CaO (1,5-5), орган. (30-40)	Pd (7,5-25)	212
3.	Снижение значений ТКС	$(2+7) \cdot 10^{-5}$	1 · 10 ⁻⁵	900-950 (водород), 5-10 мин.	TiC (12-20), TiB ₂ (3-5), Al-Ba-B-стекло (20-40)	MoSi ₂ (16-24) Pt-стекло	218
4.	Снижение ТКС, повышение стабильности к влажности, замена Pd-Ag	1 · 10 ⁻⁴	1-20 МОм/□	800-850	RuO ₂ (2-8), PbO (65-82), SiO ₂ (9,5-23)	(0,5-2)	201

Таблица 17.Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
	увеличение выхода годных элементов						
5.	Снижение ТКС, повышение влагостойкости, термостабильности	$1 \cdot 10^{-4}$	0,1-100 КОМ/□	635-640, 8-12 мин.	ZnO (30,8-36,4), Al ₂ O ₃ (5,48-6,44), Bi ₂ O ₅ (5,34-17,7), MoO ₃ (15,13-16,5), B ₂ O ₃ (32,93-35,92)	Изменение соотношений, дисперсности, режима сжигания	200
6.	Снижение ТКС, увеличение термостабильности, экономия	$0,5-1,4 \cdot 10^{-4}$	0,01-30 КОМ/□	Обычная технология	SiO ₂ (25-30), B ₂ O ₃ (0-13), Al ₂ O ₃ (2-7), Bi ₂ O ₃ (15-35), CdO (0-1)	Твердые растворы: LaB ₆ (33,5-66,2), BaB ₂ (33,8-66,5)	219
7.	Снижение ТКС, расширение диапазона сопротивлений	$(125-150) \cdot 10^{-6}$	33-220 КОМ/□	850-900°	Pb ₂ RuO ₆ (35,34-43,0), V ₂ O ₅ (0,2-2,25), Sb ₂ O ₅ (0,38-0,9), Pb-Al-B-Si-стекло	ZrO ₂ (0,38-0,9)	200
8.	Снижение ТКС, расширение диапазона сопротивлений	$(-100 \div 125) \cdot 10^{-6}$	47-470 КОМ/□	-	Pb ₂ Ru ₂ O ₆ (34,58-40,95), V ₂ O ₅ (1,9-2,25), Sb ₂ O ₅ (0,38-0,45), Pb-Al-B-Si-стекло	ZrO ₂ (0,38-0,45) PbJ ₂ (0,76-2,10)	236

Таблица 17. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
9.	Снижение ТКС и улучшение стабильности при повышенной влажности. При иных содержаниях W, Mn – возрастает ТКС и снижается стабильность	1	0,5–5 кОм/□	900–900, 0,5–1 ч	RuO ₂ (10–30), PbO (35–70), SiO ₂ (10–17)	W (2–20), MnO _x (1–10), Mn (II, III, IV). Отдельный синтез рутенатов	214
10.	Снижение ТКС, повышение стабильности	(-2,21+2,59) · 10 ⁻⁴	(0,294–5,48)	700–748	RuO ₂ (6,76–7,03), Cu ₄ Ta ₆ O ₁₉ ·H ₂ O (0,5–8), Mn ₄ Ta ₆ O ₁₉ ·H ₂ O (0,5–7,5), Стекло: Ru–34	CuO (12,24–16,97), Rh ₂ O ₃ (0,5–5)	235
11.	Снижение ТКС, повышение термостабильности	(-48++117) · 10 ⁻⁶	1 кОм–1МОм/□	1	Рутенат висмута (39,5; 13,9; 11), стекло Pb–B–Si (59,3; 79,1; 80,9), состава SiO ₂ (33,0), PbO (27,7), B ₂ O ₃ (22,4), Al ₂ O ₃ (4,8), MnO (3,0)	Абиетинат ниобия (1,2–8,1)	218

Таблица 17. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
12.	Снижение ТКС	$(-24 \pm +25) \cdot 10^{-6}$	0,84-17,12 КОМ/□	850-900 (воздух)	RuO ₂ (30-40)	La(0,35)- Ca(0,65)- Co(0,3)- Mn(0,7)O ₃	234
13.	Снижение ТКС, расширение диапазона	$(-0,5 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$	39,5-1200 КОМ/□	650-800	RuO ₂ (6,27-9,11), стекло Ru-16	NiO (2,22-4,63), CuO (3,22-6,44)	237
14.	Снижение ТКС, повышение стабильности	$2 \cdot 10^{-5} - 6,9 \cdot 10^{-5}$	0,24-5,48	745	AgO ₂ (12,6-17,76), Pd (14,86-20,85), стекло 279/2 (56,44-62,48)	M ₄ Ta ₆ O ₁₉ · nH ₂ O (4,95-10), M=Mn, Ni, Co, Cu	213
15.	Снижение ТКС, расширение диапазона сопротивлений	$(125-150) \cdot 10^{-6}$	33-220 КОМ/□	850-900	Pb ₂ RuO ₆ (35,34-43), V ₂ O ₅ (0,2-2,25), Sb ₂ O ₅ (0,38-0,9), Al-B-Si стекло (62-55)	SrO ₂ (0,38-0,9)	200
16.	Увеличение ТКС, расширение диапазона ρ _S в высокоомной области	$(-75,1 \pm +55,96) \cdot 10^{-4}$	1045±58	645	RuO ₂ (16,96-23,27), Cu ₄ Ta ₆ O ₁₉ (6,93-7,82), стекло: Ru-31-34 (55,1-56)	Mn ₂ O ₃ (13,81-20,11)	204

Таблицы 17. Продолжение

№ п/п	Цели изобретения	ТКС, °C ⁻¹	ρ _s , Ом/□	t _{ож.} , °C; t _{ож.} , мин	Состав пасты		Литература
					Компоненты прототипа, %	Дополнительные компоненты, %	
17.	Увеличение ТКС, обеспечение линейной температурной зависимости (-150)÷(200)	(12÷15)·10 ⁻⁴	1	890-910, 12-15 мин.	RuO ₂ (47-53) Pb-B-Si-стекло	Дисперсность RuO ₂ (0,06-0,08мкм)	194
18.	Отрицательное значение ТКС, увеличение термочувствительности терморезисторов	-17,69%/°C	2,2·10 ⁷	1	V ₂ O ₅ (14-14,8), (P33) ₂ O ₃	Rb ₂ CO ₃ (52,7-70)	205
19.	Заданное значение параметров	(2,6-7,3)·10 ⁻⁴	690-1110 кОм	950, 2-4 часа	In ₂ O ₃ (94-97,5), Sb ₂ O ₃ (2-3)	Nb ₂ O ₅ (0,5-3)	196
20.	Расширение диапазона ρ _s в низкоомной области	-	0,05±30%	1	Pd (17,87-18,61), Ag ₂ O (14,27-18,35), In ₂ O ₃ (7,06-7,34), стекло НО1В1/08 (14,7-15,3)	Ag (42,33-44,06) Bi ₂ O ₃ (1,75-1,84)	211
21.	Расширение диапазона ρ _s и температуры в низкоомной	(-0,52÷+0,73)·10 ⁻⁶	5	850°	RuO ₂ (40,84), Bi ₂ O ₃ (53,67), Cu ₂ O (5,49), Pb-Si-стекло	Ru (0,2-9,68)	199

Таблицы 17. Окончание

№ п/п	Цели изобретения	ТКС, °С ⁻¹	ρ _s , Ом/□	t _{вж.} , °С; τ _{вж.} мин	Состав пасты		Литература
					Компоненты прототипа, %	Дополнительные компоненты, %	
	области температурная и временная стабильность						
22.	Повышение ТКС и расширение диапазона ρ _s в высокоомной области	(75,1-559) · 10 ⁻⁴	1045±58 КОМ	645+748, 20-25 мин.	RuO ₂ (16,96-23,27), Cu ₄ Ta ₆ O ₁₉ (6,93-7,82), Стекло Ru-31,34 (55,1-56)	Mn ₂ O ₃ (13,81-20,11)	204
23.	Повышение стабильности сопротивления при комплексе воздействий (температура, высокое напряжение и пр.)	1	1	1	RuO ₂ , PbO(12-18), SiO ₂ (13-19), V ₂ O ₄ (2-4), Al ₂ O ₃ (0,3-0,7), ZrO _x (1-3), V ₂ O ₅ (1-3), Sb ₂ O ₅ (0,2-0,5)	BaO (10-15), CaO (2-4), SrO (0,5-3), Метатитанат бария (1,5-8), Диспергирование до 0,7-0,9 м ² /г	208
24.	Повышение однородности удельного сопротивления	1	1	1	Оксиды металлов, в т.ч. CoO _x , NiO _x	Смешение водных растворов азотнокислых солей и получение NiCo ₂ O ₄ (структура шпинели)	216

Стекла, имеющие 70% PbO и более 15% V_2O_5 проявляют низкую микротвердость (менее 420 кг/мм) и склонность к кристаллизации [242]. При содержании большого количества V_2O_5 ухудшается термостойкость стекол и резисторов. Стеклофаза с малым, менее 10% содержанием SiO_2 , химически малоустойчива, с более 20% SiO_2 - является слишком тугоплавкой или вязкой при температуре вжигания, что ухудшает качество поверхности резистора. Температуру сплавления оксидов в стеклообразную массу подбирают в зависимости от состава, например, стекло высокой твердости и термостойкости, предлагаемое для рутенийсодержащих резисторов: PbO - (55-70)%, V_2O_5 - (5-15)%, SiO_2 - (10-20)%, V_2O_5 - (5-15)%, Al_2O_3 - (5-15)% сплавляют при температуре 1200°C в течение 30 минут [242]. По данным японских авторов [215], состав, регулирующий режим работы фритты, содержит V_2O_5 , PbO, V_2O_5 , Co_2O_3 и (или) TiO_2 . Противоречия, встречающиеся в литературе относительно влияния модифицирующих добавок к стеклу на свойства самого стекла, а особенно резисторов, объясняются тем, что материалы, в которые вводят добавку, отличаются по качественному и количественному составу стекла и функциональной фазы, условиям обжига. Зависимости таких свойств стекла как легкоплавкость, вязкость, плотность, микротвердость, химическая активность, склонность к кристаллизации от качественного и количественного состава исходной пихты посвящены отдельные публикации [202,242,243].

Смесь порошков проводящей фазы и стекла становится пастой при добавлении органической связки. Она обеспечивает возможность нанесения резистивной композиции на подложку и обладает определенными свойствами. Органические вещества в составе композиции не должны быть летучими и гигроскопичными в обычных условиях, чтобы свойства пасты не менялись уже в ходе изготовления, и чтобы технологический процесс не требовал особого герметического оформления. Необходима их инертность по отношению к твердым компонентам и способность растворяться в одних и тех же органических средах для придания пасте нужной консистенции и возможности регулировать ее реологические показатели. Они должны легко удаляться при нагревании, чтобы исключить карбонизацию и возможные побочные реакции восстановления оксидов.

В большей части известных составов паст используется органическая фаза из смеси ланолина, вазелинового масла, циклогексанола, в основном, взятых в соотношении 15:3:1, доля ее в композиции составляет 30-40%, реже 14-20% [200,204,207,212,230,236]. Иногда применяют этилцеллозу в смеси с терпинолом, бутилацетатом, 2-5-фурандикарбеновой кислотой. Физико-химические свойства этих соединений позволяют применять их в толстопленочной технологии, но не исключают потребность поиска новых материалов.

Таким образом, успехи в области практического применения различных функциональных составляющих в резистивных пастах характеризуются в настоящее время уже не отдельными примерами, а целыми группами неорганических соединений. Из литературных данных, которые включают около 40 химических элементов, можно выделить три основные группы: 1) Pd, Ag, Ru, их оксиды – функциональные элементы, обладающие высокими электрофизическими характеристиками и определенной стоимостью, которые из экономических соображений пытаются заменять на другие; 2) бинарные соединения: оксиды, бориды, карбиды, силициды, 3) металлалты: титаналты, танталалты, ниобалты и др. Физико-химическое заключение с целью прогнозирования состава паст и получения толстопленочных элементов с заданными характеристиками требует систематических сведений о зависимостях "состав-свойство" для многокомпонентных систем, статистического подхода к анализу большого массива информации о составах паст. Для количественного анализа такого рода информации существуют корреляционные методы, основанные на правилах линейности свободных энергий. На данном этапе из-за отсутствия количественных данных можно предложить опыт качественного анализа, где за параметр принимается частота попарного (тройного и т.д.) введения компонентов в пасту. В качестве примера в таблице 18 изображена матрица случаев парных добавок компонентов в пасты. Выборка сделана из периодических изданий и патентных описаний за период 1973–1998 г.г. и включает 11 наиболее часто используемых химических элементов.

При дальнейшем развитии исследований в данной области можно применять методы факторного планирования для построения формальной статистической модели процессов образования резистивных элементов из паст, использовать уже имеющийся банк данных термодинамических свойств веществ и пакет прикладных программ моделирования процессов толстопленочной технологии [244].

Таблица 18

Матрица частот парных сочетаний химических элементов в резистивных пастах

Группа	Ia	Iб	IIa	IIб	Va	Vб	VIб	VIIб	VIII	VIII	VIII
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Элемент	Ag	Cu	In	P3Э	Sb	Ta	Mo	Mn	Ru	Pd	Ni
Ag	X	1	3	1	1	2		2	1	10	2
Cu	1	X				5					4
In	3		X		2				2	4	
P3Э	1			X	1		2	2	1	1	1
Sb	1		2	1	X				7		
Ta	2	5				X	1	5	4	2	3

Таблица 18. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Группа	Ia	Iб	IIa	IIб	Va	Vб	VIб	VIIб	VIII	VIII	VIII
Mo				2		1	X		1		1
Mn	2	5		2		5		X	6	2	4
Ru	1	7	2	1	7	4	1	6	X	1	4
Pd	10	1	4	1		2		2	1	X	1
Ni	2	4		1		3	1	4	4	1	X

Анализ литературы по выбору материалов для получения резистивных и диэлектрических пленок, исследованию их свойств и применению в производстве микросхем позволяет сделать следующие выводы:

1. Наиболее простым, универсальным и широко распространенным методом получения резистивных и диэлектрических пленок для RC-элементов небольших номиналов по-прежнему является вакуумно-термический. Однако для получения элементов на основе многокомпонентных и тугоплавких материалов более широкими техническими возможностями обладают методы ионного распыления.

2. Широкое применение в производстве тонкопленочных резисторов нашли такие материалы, как: Cr, Ni, Ta, NiCr, сплавы типа MLT ..., PC ..., KC ..., а также кермет, Cr-SiO. При изготовлении тонкопленочных конденсаторов применяют SiO₂, SiO, GeO, Al₂O₃, Ta₂O₅, боро- и алюмосиликатные стекла.

3. Повышение требований к параметрам пассивных элементов микросхем и расширение диапазона их номинальных значений стимулирует дальнейший поиск и исследование новых материалов типа керметных и металлосилицидных для резисторов и тугоплавких диэлектриков для конденсаторов. Эффективным методом распыления таких материалов может быть ионно-плазменный.

4. Исследуемые в настоящее время керметные, тугоплавкие или стеклообразные соединения позволили в лабораторных условиях получить высокоомные резисторы с r_s до 100 кОм/□ и конденсаторы с удельной емкостью до 0,1 мкФ/см². Это позволяет надеяться на возможность повышения номиналов RC-элементов в ближайшие годы в 5-10 раз.

5. Высокие электрофизические характеристики толстопленочных резистивных элементов могут быть обеспечены на основе серебро-палладиевых, баридных, рутениевых и других паст. Однако низкая воспроизводимость их свойств требует поиска новых режимов их нанесения термообработкой, подгонки номиналов.

7. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МИКРОСБОРОК

7.1. Виды контроля качества

Процессы разработки, изготовления и применения МСБ сопровождаются большим количеством контрольных операций. Основной задачей контроля является проверка соответствия параметров технологических процессов, материалов и сред, структур ИМС, а также технической документации установленным техническим требованиям [16].

На этапе проектирования ИМС разработчик получает необходимую информацию путем анализа статистических параметров тестовых элементов и структур, изготовленных по выбранному технологическому процессу и имитирующих отдельные элементы, узлы и фрагменты ИМС. Для этого разрабатывают специальные тестовые ячейки, которые должны содержать полный набор тестовых элементов. Поэтому основным видом контроля на этапе проектирования ИМС является тестовый контроль. С помощью него обосновывается применимость технологического процесса проектируемой МСБ и осуществляется выбор компонентов и комплектующих с параметрами, обеспечивающими высокое качество разработки.

На этапе технического проектирования основным видом контроля качества является контроль технической документации на соответствие электрической принципиальной схеме (или функциональной схеме), проектным нормам (технологическим и конструктивным требованиям и ограничениям) и требованиям ЕСКД.

На этапе изготовления микросборок используют два вида контроля их качества: производственный контроль и контроль готовых МСБ. Производственный контроль может быть осуществлен как путем измерения параметров элементов и структур, сформированных в результате проведения технологической операции (или блока операций), так и путем контроля технологических режимов, характеризующих данную операцию. Производственный контроль параметров элементов и структур микросборки подразделяют на следующие виды: входной, межоперационный и финишный.

Входному контролю подвергают материалы, подложки, компоненты, полуфабрикаты, вспомогательные и комплектующие изделия, поступающие на сборку. Межоперационный контроль осуществляют с целью оценки качества проводимых операций. В этом случае

контролируют качество очистки подложек и слоев, напыления, нанесения паст, фотолитографии, термообработки, монтажа и др.

Межоперационный контроль проводят либо после выполнения, либо в ходе технологической операции. В качестве контролируемых объектов используют как сформированные структуры и элементы, так и технологические режимы и среды. Финишный контроль проводят по завершении определенного этапа изготовления микросборки. Сюда относят контроль пассивных элементов, контроль монтажа компонентов, контроль коммутационных плат и т.д. На завершающем этапе изготовления микросборки финишный контроль совпадает с контролем качества готовых МСБ.

Контроль готовых МСБ осуществляют путем измерения электрических параметров, характеризующих данную МСБ. Такой контроль проводят либо при нормальных условиях окружающей среды, либо в режимах, имитирующих условия эксплуатации. В последнем случае контроль качества является одним из этапов испытаний.

Производственный контроль может быть пассивным или активным (диагностическим). При пассивном контроле регистрируется только факт существования дефекта по принципу «годен - не годен». Природа дефекта не вскрывается. Пассивный контроль фактически сводится к сортировке. Диагностический контроль дает информацию о природе, источнике дефектов. Такой контроль позволяет вносить необходимые изменения в технологические режимы.

В организационном плане различают сплошной контроль, когда контролируются параметры всех микросборок, и выборочный, когда контролируется часть МСБ.

7.2. Пассивный контроль качества МСБ

Спецификой тонкопленочных гибридных ИМС. МСБ является изготовление пассивной части в непрерывном вакуумном цикле. В этом случае контролируют не только параметры тонкопленочных структур, но и основные режимы напыления – толщину и скорость нанесения пленок. Толщина и скорость роста тонких пленок сильно влияют на их электрофизические характеристики.

К методам и аппаратуре контроля толщины и скорости нанесения тонких пленок предъявляются следующие основные требования: малая погрешность измерений (единицы процентов); высокая надежность, стабильность во времени и независимость показаний от условий работы;

высокая чувствительность и ее постоянство в широком диапазоне измеряемых величин.

Методы измерения толщины и скорости нанесения пленок, несмотря на разнообразие физических принципов, обладают универсальностью и могут быть использованы для измерения как параметров потока испаряемого материала, так и параметров пленки, осаждаемой на подложку. Для этих целей наибольшее применение нашли резистивный, резонансно-частотный и ионизационный методы.

Резистивный метод основан на измерении сопротивления резистивной пленки (металлической, керметной и др.) в процессе ее нанесения. В процессе осаждения в непосредственной близости от подложки устанавливают «свидетель» из изоляционного материала (ситалла, стекла и др.) в виде квадратной или прямоугольной пластины. На краях пластины должны быть напылены контакты из серебра или меди. К ним подключается измерительный мост [245]. При этом необходимо, чтобы ток в измерительной цепи омметра, проходящий через «свидетель», не превышал допустимой величины, которая может повлиять на условия формирования контролируемой пленки [246]. Отечественной промышленностью выпускаются приборы КС-1 и КС-2. Последний позволяет измерять сопротивление в диапазоне от 0 до 100 кОм с точностью до 0,5% [16].

В основу резонансно-частотного метода положено свойство кристалла кварца изменять частоту колебаний при нанесении на его поверхность дополнительной массы [246]. Изменяя изменение частоты генератора при нанесении какого-либо материала на кварцевый или другой пьезопреобразователь, включенный в контур этого генератора, можно определить толщину осаждаемой пленки, зная ее плотность.

Толщину пленки h в этом случае определяют следующим образом:

$$h = \frac{m_0}{f_0 \gamma S} \Delta f,$$

где m_0 – масса преобразователя до нанесения на него пленки;

f_0 – резонансная частота преобразователя до нанесения на него пленки;

γ – плотность осаждаемой пленки;

S – площадь преобразователя, покрытая пленкой;

Δf – изменение резонансной частоты преобразователя после нанесения на него пленки.

Отечественной промышленностью выпускаются приборы КИТ-1 и КИТ-2, которые позволяют измерять толщину осаждаемой пленки в пределах от 0,01 до 5 мкм. Однако, отечественной промышленностью специальные пьезоэлементы для этой цели практически не

выпускаются [247]. Как было указано контроль осуществляется пьезоэлементами кварцевых резонаторов, выполняющих иные функции (обычно функцию стабилизации частоты). Это приводит к значительной погрешности измерения. Кроме того, максимальная нагрузка таких пьезоэлементов во многих случаях не удовлетворяет требованиям производства тонкопленочных плат. Авторами [247] предлагаются специальные пьезоэлементы, которые уменьшают температурную погрешность.

В ряде случаев можно использовать емкостной метод. В основу метода положено измерение малых (от десятых долей до единиц процентов) приращений емкости плоского гребенчатого конденсатора при осаждении на него пленки диэлектрика [245]. При нанесении на конденсатор диэлектрической пленки его емкость C возрастает вследствие изменения диэлектрической проницаемости на величину ΔC :

$$C = C_0 + \Delta C;$$

$$\Delta C = f(\epsilon) h,$$

где C_0 - начальная емкость конденсатора;

ϵ - диэлектрическая проницаемость материала пленки.

При малых толщинах диэлектрических пленок (в пределах единиц мкм) изменение емкости от толщины диэлектрика практически имеет линейный характер. К недостаткам метода следует отнести необходимость калибровки прибора по каждому осаждаемому материалу, а также необходимость периодической очистки конденсатора от скопившейся на его поверхности пленки.

В основе ионизационного метода лежит ионизация молекулярного потока электронами, эмиттируемыми раскаленным катодом, и измерение величины ионного тока. При этом величина ионного тока будет пропорциональна плотности пара вещества (скорости осаждения пленки), проходящего через ионизационный преобразователь, если он расположен рядом с подложкой. В выпускаемых отечественной промышленностью приборах ИСТИ-1 и ИСТИ-2 для отделения полезного сигнала от помехи, создаваемой хаотически перемещающимися молекулами остаточных газов, используют модуляцию молекулярного потока испаряемого вещества. Относительная погрешность измерения толщины и скорости данными приборами не превышает $\pm 10\%$.

Существенным недостатком ионизационного метода является то, что его нельзя использовать при ионно-плазменном и катодном распылении.

В таблице 19 приведены сравнительные характеристики методов измерения толщины и скорости нанесения тонких пленок.

Основные электрофизические характеристики тонкопленочных элементов в сильной степени зависят от температуры подложки в процессе осаждения. Для контроля температуры подложки обычно используют

терморезисторы или термопары, включенные в цепь измерительных устройств. Промышленные установки вакуумного напыления обычно комплектуются милливольтметрами типа МПЩПр-54 или автоматическими самопишущими мостами типа МСР1-08. Мост МСР1-08 позволяет измерять температуру от 0 до 500°C. На лицевой стороне прибора расположена шкала в градусах Цельсия и диаграммная лента.

Таблица 19

Сравнительные характеристики методов измерения толщины и скорости нанесения пленок

Метод	Резистивный	Резонансно-частотный	Ионизационный
Материал пленки	Металлы	Любой	Любой
Предельная (максимальная) измеряемая толщина	1 мкм	Несколько микрон	Не ограничена
Предельная (максимальная) измеряемая скорость	-	-	Не ограничена
Чувствительность	-	1 А°/сек	1 А°/сек
Точность, %	5	1	1-5
Возможность автоматизации	Имеется	Имеется	Имеется
Возможность использования при ионноплазменном и катодном распылении	Имеется	Имеется	Не имеется
Марка отечественных приборов	КС-1	КИТ-1	ИСТИ-1
Область применения метода	В производстве	В производстве	В производстве

После напыления слоев производят контроль пассивной части микросборки по внешнему виду. Это первая операция межоперационного контроля. Она позволяет выявить следующие виды явно выраженных дефектов пленок: смещение слоев относительно друг друга и краев подложки; искажение топологического рисунка пассивной части МСБ; вздутие и отслаивание участков пленки; капли испаренного материала на поверхности пленок; царапины на пленках.

Для этих целей обычно используют оптические микроскопы типа МБС-1, МБС-9, МБС-200.

После отбраковки плат МСБ по внешнему виду производят контроль электрических параметров. При этом контролируют удельное

поверхностное сопротивление проводников и резисторов, сопротивление изоляции, емкость и тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов и межсоединений. Измерение этих параметров характеризуется рядом особенностей, обусловленных малыми размерами пленочных элементов, большим количеством и разнообразием таких элементов на одной подложке, а также широким диапазоном значений измеряемых параметров [248].

Поскольку контактные площадки отличаются малыми размерами и малыми расстояниями между собой, то при измерении параметров элементов микросхем необходимо использовать специальные приспособления [246]. Они должны обеспечивать малое переходное сопротивление между зондом и контактной площадкой. Широкое распространение получили двухзондовые контактные приспособления. Зонды изготавливают из латуни. Заостренные концы зондов покрывают серебром. Время, затрачиваемое на перестановку зондов с одной пары контактных площадок на другую достигает 3с. Процесс контроля является крайне трудоемким. В серийном производстве чаще используют многозондовые приспособления. Они обеспечивают одновременное контактирование ко всем или большинству контактных площадок. Время контроля параметров элементов МСБ при этом сокращается. Однако, надежность таких приспособлений является недостаточной.

Для измерения электрических параметров используют различные типы мостов, омметры, измерители емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. В таблице 20 приведены основные методы и средства межоперационного контроля тонкопленочных гибридных ИМС по данным [16].

Таблица 20

Методы и средства производственного контроля тонкопленочных гибридных ИМС после основных операций изготовления

Технологическая операция	Контролируемые параметры	Методы контроля	Средства контроля	Вид контроля	Примечание
1	2	3	4	5	6
Очистка подложек	Чистота поверхности	Визуальный	Микроскоп МБС-200	Цех. ОТК - 10%	Отсутствие различных загрязнений
Напыление резистивной пленки (сплошной слой)	Толщина	Резистивный, резонансно-частотный, ионизационный	Приборы КС-2, КИТ-2, КСТ-1	В процессе напыления на подложках-спутниках	

Таблица 20. Продолжение

1	2	3	4	5	6
	Внешний вид Удельное поверхностное сопротивление	Визуальный Электрический	Микроскоп МБС-200 Измеритель ИУС-1	Цех, ОТК – выборочно То же	Равномерность покрытия В соответствии с ТД
Напыление проводящей пленки (сплошной слой)	Толщина Внешний вид	Резистивный, резонансно-частотный, ионизационный Визуальный	Приборы КС-2, КИТ-2, КСТ-1 Микроскоп МБС-200	В процессе напыления Цех, ОТК – выборочно	 Равномерность покрытия
Фотография проводящего слоя	Внешний вид	Визуальный	Микроскоп МБС-200	Цех, ОТК-100%	Рисунок должен соответствовать чертежу
Фотография резистивного слоя	Внешний вид Сопротивление резисторов	То же Электрический	То же МОСТ Р-336	То же Цех – 100% ОТК-выборочно	То же В соответствии с ТД
Напыление нежелезных оксидов, диэлектрика и	Толщина	Резонансно-частотный, ионизационный	Приборы КИТ-2 КСТ-1	В процессе напыления	

Таблица 20. Продолжение

1	2	3	4	5	6
верхних обкладок (каждый через маску)	Емкость конденсаторов	Электрический	Прибор Л2-7	Цех-100%, ОТК-выборочно	В соответствии с ТД
	Напряжение пробоя конденсаторов	Электрический	Прибор ПНХТ-1	Цех, ОТК-выборочно	То же
	Внешний вид	Визуальный	Микроскоп МБС-200	Цех-100%, ОТК-выборочно	Рисунок должен соответствовать чертежу
Нанесение защитного слоя	То же	То же	То же	То же	То же
Скрайбирование и ломка подложек на платы	Внешний вид и размер плат	То же	То же	То же	Отсутствие сколов, царапин
Монтаж компонентов на плату	Внешний вид	То же	То же	То же	
Монтаж плат на основание корпуса	То же	То же	То же	То же	

Таблица 20. Окончание

1	2	3	4	5	6
Присоединение выводов	Внешний вид	То же	То же	То же	-
	Прочность соединения	Механический, визуальный	Граммометр, микроскоп МБС-1	ОТК-выборочно (три соединения из партии)	
Герметизация	Внешний вид	Визуальный, горячим маслом	Микроскоп МБС-2,	Цех, ОТК-100%	-
	Герметичность		Установка контроля герметичности УК1М-2	То же	

7.3. Контроль паст и толстоплёночных элементов микросборок

Для достижения высокой надёжности гибридных толстоплёночных микросхем и микросборок необходим постоянный контроль исходных материалов и физико-химических процессов, протекающих на различных этапах технологического процесса [249].

Качество исходных композиционных материалов определяет воспроизводимость параметров элементов схемы. Поскольку электрофизические параметры плёночных элементов определяются физико-химическим составом паст и их полиграфическими свойствами, то входной контроль исходных материалов паст и выявление присутствия трудно контролируемых примесей — основная задача контроля за изготовлением паст. Такими методами анализа могут быть: хроматографический, спектральный, рентгеновский и др.

Свойства паст определяются множеством факторов, среди которых немаловажными являются размер и форма частиц порошка; гранулометрический состав в значительной степени определяет режимы термохимических реакций, поэтому анализ дисперсности материалов должен предшествовать технологическому процессу. Закон

распределения размеров и форма частиц оказывают большое влияние на многие важные физические и электрические свойства [250].

Особое внимание уделяется также совместимости различных функциональных материалов. Требования совместимости сводятся к тому, чтобы материалы проводников и диэлектриков не вступали в реакцию, которая может повлиять на их характеристики.

Для осуществления трафаретной печати пасты должны обладать хорошими полиграфическими свойствами. Воспроизводимость процесса при этом определяется вязкостью пасты. Ещё одним важным фактором является соответствие КТР подложки и материала наносимой пленки.

Требуемые физические и электрические свойства толстых плёнок проявляются в результате химических реакций, протекающих при вжигании. Контроль процессов вжигания даёт возможность подобрать нужный температурный профиль по электрическим характеристикам толстоплёночных элементов.

Таким образом, направление микроэлектроники - изготовление пассивной части микросхем и микросборок методами толстоплёночной технологии - для целенаправленного развития требует большого количества методов контроля и изучения материалов (компонентов, композиций) и процессов их обработки. Методы имеют множество научно-технических направлений и анализ каждого - отдельно решаемые задачи. Общий анализ даёт картину, представленную в таблице 21, в которой указаны параметры, контролируемые в настоящее время, и те параметры, контроль которых необходим.

Исходные материалы композиционных паст применяются в порошковом состоянии. В зависимости от поставленной цели используются следующие методы измерения и определения параметров порошков, которые делятся на пять групп: классификационная, седиментационная, центрифугирования, оптических методов, электрических методов. Наиболее простым является метод определения удельной поверхности порошков, основанный на измерении пневматического сопротивления порошковых составляющих [251.252]. Метод предназначен для анализа частиц больших размеров (около 80 мкм).

Методы седиментации и центрифугирования основаны на законе Стокса, описывающем движение микроскопических частиц в жидкой или газообразной среде под действием силы тяжести или центробежной силы. При седиментационном методе определяют стационарную скорость оседания частиц как меру их дисперсности либо накопления веса остатка во времени. Диапазон измерений этими методами 5-100 мкм. Недостаток их заключается в длительности времени подготовки проб и проведения анализа. В последнее время применяются некоторые методы, сочетающие одновременно седиментацию, подсчет частиц и разделение с применением различных автоматических и оптических счётчиков.

Таблица 21

Методы определения параметров технологических процессов и свойств материалов, участвующих в них

Технологические процессы	Параметры технологических процессов	Параметры объекта, формируемые воздействием (или воспринимающие его)	Оценка параметра объекта
1	2	3	4
Приготовление порошковых компонентов	Параметры синтеза или другого химического процесса; длительность измельчения на данном устройстве	Химический состав, гранулометрический состав; физическое состояние	Химический анализ, спектральный (оптический и рентгеновский); эффект Мессбауэра; границы фазовых изменений (термогравиметрический анализ), микроскопический анализ, удельная поверхность
Приготовление органической связки	Температура (Т)	Степень, взаиморастворения, вязкость, $\eta = f(T)$, давление паров $P = f(T)$, плотность $s = f(T)$	Газовая хроматография, вискозиметрия, схемы соответственно для $\eta = f(T)$; $P = f(T)$; $s = f(T)$
Отвешивание и перемешивание компонентов	Точность взвешивания, длительность перемешивания на данном устройстве, температура	Степень гомогенности, вязкость	Вискозиметрия

Таблица 21. Окончание

1	2	3	4
Нанесение слоев проводниковых и диэлектрических	Статические и геометрические параметры, устройства нанесения, кинематические условия, температура и давление в пасте	Толщина, равномерность, конфигурационное соответствие	Визуально, микроскопия
Сушка слоев		Содержание связки, твердость	Химический анализ; твердомер
Вжигание и охлаждение слоев		Степень кристалличности, размеры элементов ячейки, кристаллов; химический состав; плотность и твердость; толщина; адгезия; номинал; электрофизические характеристики	Химический анализ, спектральный (оптический и рентгеновский), эффект Мёсбауэра, микроскопический анализ, профилометр, плотность, адгезия, электрофизические измерения, термоанализ

Примечание: Т - температура; Р - давление; ρ - плотность; η - вязкость

Электрический метод наиболее широко применяемый разработан Культером [253]. Результаты, получаемые этим способом, непосредственно связаны с определением объема частиц. Способ и прибор Культера усовершенствованы, что позволило осуществить полную автоматизацию и расширить диапазон измерений [253].

Для измерения порошков с диаметром частиц 0,05 - 10 мкм фирма Shan-don Labortechnic разработала радиоизотопный метод, заключающийся в применении специальных фильтров с величиной пор 8 - 0,05 мкм, через которые пропускают облученные частицы. Измерительное устройство регистрирует импульсы, соответствующие измеряемому изотопу - виду частиц.

Для увеличения точности измерения степени дисперсности и

уменьшения времени проведения анализа разработаны с применением световых пучков сканирующий, оптический и электронный микроскопы, лазерный гранулометр. Французская фирма Serilk предложила метод измерения частиц в диапазоне 0.5 - 128 мкм с применением лазерного гранулометра. Распределение частиц по размерам определяется по результатам измерений параметров дифракционной картины, получаемой от пробы, помещенной в жидкость - наполнитель. Для предупреждения коагуляции частиц используется УЗ-измеритель [254].

Все перечисленные методы, помимо измерения абсолютного значения частиц, дают относительное распределение частиц по размерам в заданном диапазоне.

Содержание влаги в порошковых компонентах характеризуется влагосодержанием (абсолютная влажность) и влажностью (относительная влажность). Первый параметр определяется отношением массы влаги к массе абсолютно сухого тела, второй - отношением массы влаги к массе влажного материала.

Наиболее распространённым методом определения влагосодержания является весовой, который в настоящее время применяется в сочетании с параллельным контролем температуры (термогравиметрия) и даёт наиболее точную информацию о содержании влаги в порошках. Прямыми способами определения влаги являются также дистилляционный, экстракционный и химический. По первому способу образец подогривают в сосуде с жидкостью, не смешивающейся с водой, и измеряют количество паров воды и этой жидкости, отгоняемых в измерительный сосуд. По второму - влагу из образца извлекают водопоглощающей жидкостью (спирт, диоксан) и определяют изменённые свойства этой жидкости (плотность, показатель преломления и т. п.). По третьему способу образец обрабатывают реагентом, который вступает в химическую реакцию только с влагой, и определяют объём продукта реакции.

В работе [255] предложен способ определения влажности по теплоте реакции взаимодействия селективных реагентов с влагой, сорбированной анализируемой пробой.

Различные косвенные методы в большинстве приспособлены к специфическим особенностям исследуемого материала, которые условно можно разделить на механические, электрические и многопараметрические. Наиболее приемлемы для измерений влажности некоторые физические методы, так как они отличаются быстродействием и могут быть включены в автоматизированную систему управления технологическими процессами. В частности, измерение полной проводимости или ёмкостные измерения дают информацию о содержании влаги в порошках, причём позволяют многократно повторять измерения на одном и том же образце.

Применимы для определения влажности компонентов паст также

весовой или термографический способы.

Химические составы композиционных паст и их компонентов очень разнообразны, поэтому комплексный анализ этих систем очень затруднителен. Для анализа по каждому элементу необходимо составлять индивидуальную методику.

Наиболее широко используются универсальные методы. В первую очередь это спектральные оптические методы, в частности эмиссионный и атомно-абсорбционный плазменно-фотометрические методы. При эмиссионном методе измеряется степень излучения света атомами, а при абсорбционном - степень поглощения падающего света.

Эмиссионный спектральный метод наиболее приемлем при определении микропримесей и примесей ($1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-7} \%$). Целесообразно использовать этот метод, если требуется одновременно определить большое количество примесей; при этом ошибки возрастают и составляют 5 - 10%, поэтому, используя этот метод, можно проводить только качественный или полукачественный анализ, например основного химического состава стекла.

Эмиссионный плазменно-фотометрический метод успешно применяется для определения щелочных элементов и полностью вытесняет трудоёмкие химические методы.

Новым перспективным методом определения содержания элементов от 0,01 до 30% является атомно-абсорбционный плазменно-фотометрический метод. В этой области концентраций воспроизводимость составляет 1-2%.

Атомно-абсорбционный метод благодаря применению непламенных атомизаторов и предварительному концентрированию успешно используется для определения микропримесей ($1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-5} \%$) с воспроизводимостью (5-7)%.

Для проведения анализа методом пламенной фотометрии необходимым условием является приготовление образца в виде аэрозоля, вводимого в пламя горелки, дуги и т. п. Кроме этого точность и воспроизводимость таких методов не всегда удовлетворяет, поэтому для исследования стеклообразных материалов широкое применение нашла инфракрасная спектроскопия как очень продуктивный метод для изучения и создания новых стекол.

Спектральный анализ сложных молекулярных соединений имеет большое значение при контроле синтеза химических соединений, производится он на основе наблюдения и регистрации спектров поглощения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра (включая микрорадиоволновую), а также спектров комбинационного рассеяния и люминесценции [256].

Состав вещества можно определить с помощью рентгеноспектральных методов, которые основаны на изучении спектров испускания или поглощения характеристического рентгеновского излучения атомов

анализируемых элементов, возникающего при возбуждении атомов рентгеновскими лучами (рентгенофлуоресцентный метод) или электронами (микрорентгено-спектральный метод).

Рентгенофлуоресцентный метод даёт возможность определять все элементы, начиная с фтора, при содержании их от 0,01 до 100%. Воспроизводимость метода не ниже 1%. Учитывая возможность проведения анализа порошкообразных, жидких и твердых образцов, можно сделать вывод, что этот метод является перспективным для исследования состава пленочных материалов и готовых элементов. В свою очередь, микрорентгеноспектральный анализ даёт возможность получать информацию об элементном составе с разрешением по поверхности и глубине изучаемых образцов 1-3 мкм и высокой абсолютной чувствительностью 10^{-14} .

Микрозондовый метод позволяет провести качественный и количественный анализ в точке диаметром 2-3 мкм, получить профиль распределения любого числа элементов по выбранному направлению, а также микрофотографии распределения элементов на поверхности образца размером 100×100 и 100×200 мкм.

Высокая экспрессность, чувствительность (не хуже 0,01%) и точность ($\geq 2\%$ для микрорентгеноспектрального анализа и $\geq 0,3\%$ для рентгенофлуоресцентного анализа) дают возможность осуществлять оперативный контроль состава керамических масс, шликеров, сплавов и других многокомпонентных материалов и изготавливаемых на основе изделий, в том числе и с весьма сложной геометрией, что характерно для микроэлектроники.

Микрорентгеноспектральный анализ - один из наиболее эффективных методов исследования строения паяных узлов.

Рентгеноструктурный анализ, основанный на дифракции рентгеновских лучей, успешно применяется для изучения фазового состава материалов и фазовых превращений, происходящих в них при высоких и низких температурах, при приложении электрического поля, а также для исследования твердофазных реакций в процессе высокотемпературного синтеза материалов, для определения параметров кристаллической решетки и химического состава твердых растворов, керамических веществ, ориентации и механических напряжений в тонких слоях различных материалов.

Наряду с рентгеновскими спектральными методами всё большее применение находят методы электронной спектроскопии, позволяющие проводить локальный анализ и значительно повышающие точность определения легких элементов, имеющие широкую область возможного применения.

Растровая электронная микроскопия позволяет измерять в различных режимах поверхностные конфигурации с разрешением $2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-3}$ мкм.

определять, наблюдать топографические и композиционные неоднородности с пространственным размещением $5 \cdot 10^{-3}$ мкм, исследовать напряжённость магнитных и электрических полей и их распределение по поверхности.

В последние годы для решения многих задач в области физики поверхности, материаловедения, электронной техники и технологии применяется метод вторично-эмиссионной электронной спектроскопии.

Наиболее перспективными вариантами метода вторично-эмиссионной спектроскопии являются электронная Оже-спектроскопия (ЭОС) и дифракция медленных электронов (ДМЭ). Методы ЭОС и ДМЭ тесно связаны между собой благодаря их взаимодополняемости. Они позволяют получать две важные характеристики поверхности атомных слоев: расположение атомов (ДМЭ) и состав поверхности (ЭОС). В основе методов лежат специфические особенности энергетических и угловых распределений электронов, покидающих поверхность, бомбардируемую электронным пучком.

Комбинация методов ЭОС и ДМЭ значительно расширяет возможности исследования различных поверхностных явлений, прежде всего взаимосвязь атомной структуры поверхности с химической природой атомов (табл. 22, 23).

Наиболее перспективными являются методы анализа состава и строения вещества с помощью лазерного зонда - специально сфокусированного пучка лазерного излучения. Возможности лазерного зондирования весьма широки:

дистанционное зондирование, пространственно-временное исследование профиля интересующего параметра по пути распространения луча, очистка исследуемой поверхности от атомов остаточного газа и стимулирование электронной эмиссии импульсом излучения и др.

Применение метода лазерного зондирования позволяет избежать возмущения исследуемой среды, осуществить безинерционный разогрев любого вещества с выносом теплового источника на большое расстояние. достигнуть заданной температуры твердого тела.

Для лазерного микроспектрального анализа достаточно 10^{-6} г вещества; при этом абсолютная чувствительность метода достигает 10^{-11} - 10^{-12} г. Классический спектральный анализ с искровым и дуговым возбуждением имеет абсолютную чувствительность на 1-2 порядка лучше, однако в этом случае необходимо испарить вещества более чем в 10^4 раз.

В последнее время для изучения свойств приповерхностных слоев полупроводниковых материалов и приборов все шире используются ядерно-физические методы, основанные на регистрации энергии продуктов ядерных реакций, позволяющие определять содержание практически всех элементов в слое до 5 мкм с шагом 0,01-0,1 мкм, местоположение примесных атомов в кристаллических структурах. Благодаря

использованию этих методов можно получать важную, а в некоторых случаях уникальную информацию о материалах и изделиях микроэлектроники как на стадии разработки паст и отработки технологии изготовления микросборок, так и на стадии их производства.

Таблица 22

Методы анализа поверхности [257]

Метод	Характеристика пучков		Получаемая информация
	первичного	вторичного	
1	2	3	4
Электронная Оже-спектроскопия	Электроны 3 кэВ, 1-50 мкА	Оже-электроны	Электронный состав поверхности
Электронная спектроскопия для химического анализа	Рентгеновские лучи	Фотоэлектроны с внутренних оболочек	Элементный состав. Химические связи поверхности
Масс-спектрометрия вторичных ионов	Ионы 1 кэВ(10^{-9} А)	Фотоэлектроны с валентных уровней. Ионы распыленного материала	Плотность состояний заполненной валентной зоны. Электронный состав, химические связи поверхности
Обратное рассеяние медленных ионов	Ионы инертных газов	Упруго отраженные ионы	Элементный состав поверхности
Резерфордское обратное рассеяние быстрых ионов	Высокое электрическое поле и парциальное давление инертного газа	Угловое распределение ионов, ионизированных вблизи поверхности	Структура низкоиндексных поверхностей
Дифракция медленных электронов	Электроны 20 - 300 эВ, 1 мкА	Условное распределение упруго отраженных электронов	Структура упорядоченной поверхности

Таблица 22. Окончание

1	2	3	4
Дифракция быстрых электронов	Электроны 30—100 кэВ	То же	То же
Эмиссионная микроскопия	Высокое электрическое поле	Угловое распределение электронов, эмитированных полем	Работа выхода с поверхностей различной кристаллографической ориентации
Ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия	УФ-излучение, 20 эВ	Фотоэлектроны	Энергетическая структура, химическая связь, строение адсорбированных слоев
Ионная нейтрализационная спектроскопия	Ионы, единицы эВ	Оже-электроны	То же, но с меньшей точностью

Таблица 23

Характеристика методов исследования химического состава [258]

Метод	Диаметр зонда, мкм	Глубина анализа		Оптимальная чувствительность $\times 10^{-4}$ %	Воспроизводимость	Определяемые элементы	Особенности и возможности метода
		мкм	атомные слои				
1	2	3	4	5	6	7	8
Рентгеновская флуоресцентная спектроскопия	10^4	3—100	10^4 — $3 \cdot 10^5$	1—100	± 1	С атомным номером более 9	Количественный, неразрушающий; применим к диэлектрикам

Таблица 23. Продолжение

1	2	3	4	5	6	7	8
Рентгеновский микроанализ	1	0,03—1	10^2 — $3 \cdot 10^3$	100— 10000	± 2	С атомным номером более 4	Количественный, неразрушающий
Масс-спектрометрия твердых тел	10— 100	1—10	$3 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^4$	0,01-10	± 20	Все элементы	Полуколичественный чувствительный к электрическим помехам
Спектрометрия рассеянных ионов	10^3	—	1	1000— 10000	± 20	Все, кроме H, He	Полуколичественный профиль концентрации; применим к диэлектрикам
Масс-спектрометрия вторичных ионов	10^3	—	3	0,1—100	± 2	Все элементы	Полуколичественный профиль концентрации
Ионный микроанализ	1—300	—	10—1000	0,1—100	± 2	То же	Полуколичественный профиль концентрации в трех измерениях
Оже-электронная спектроскопия	25— 100	—	2—10	100— 1000	± 2	Все, кроме H, He	Полуколичественный профиль концентрации

Таблица 23. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8
Сканирующий Оже-микроспектральный анализ	4—15	—	2—10	1000—10 000	±20	Те же	Полуколичественный профиль концентрации в трех измерениях
Электронная спектроскопия для химического анализа	10 ⁴	—	2—10	1000—10 000	±20	» »	Полуколичественный тип валентных связей

Нейтронноактивированный анализ (НАА) в исследованиях материалов и изделий микроэлектроники основан на регистрации излучений радиоактивных ядер, образовавшихся в результате воздействия потока нейтронов на исследуемый материал. Основная область его применения - определение содержания примесных элементов вплоть до 10^{-10} мас.% в материалах высокой степени чистоты.

НАА характеризуют высокая чувствительность и селективность определения элементов. По чувствительности он сравним с масс-спектрометрическим и атомно-абсорбционным методами и значительно превосходит химический и эмиссионно-спектральный. Однако чувствительность при определении различных элементов может отличаться на несколько порядков, что ограничивает его применение. К важным преимуществам метода относятся его универсальность (независимость от химического и агрегатного состояния анализируемого вещества), возможность определения состава образца без его разрушения, точность и экспрессивность.

Существует много методов комплексного термического анализа материалов, используемых в микроэлектронике. Расширение аппаратных возможностей современного термического анализа (увеличение температурного диапазона и использование любых газовых

сред) выдвигает его в ряд основных методов исследования процессов, происходящих в материалах при термической обработке, дает возможность моделировать конкретные технологические операции, глубже понимать их физико-химическую природу и тем самым способствует ускоренному созданию требуемых материалов и изделий микроэлектроники с заранее заданными свойствами.

При термогравиметрическом анализе образцы непрерывно взвешивают в процессе его нагрева (охлаждения) с заданной скоростью; при этом изменения массы могут регистрироваться в интегральной (ТС) и дифференциальной (ДТС) формах.

Дифференциальный термический анализ (ДТА) позволяет изучать фазовые превращения в системах или индивидуальных веществах по сопровождающим эти превращения тепловым эффектам.

Исследуемое вещество подвергается нагреванию или охлаждению с непрерывной регистрацией температуры образца. В случае фазового превращения в веществе изменяется скорость его нагревания или охлаждения за счёт поглощения или выделения тепла. Изменения скорости нагрева регистрируются, например, дифференциальной термопарой, измеряющей разность температур между исследуемым веществом и эталоном-веществом, не испытывающим в исследуемом интервале температур никаких фазовых превращений. Тепловой эффект, зарегистрированный аппаратурой ДТА, может быть измерен калориметрически. Результаты калориметрических измерений обрабатываются графическими методами или с применением аналогоцифрового преобразователя.

Методы термографического анализа могут быть использованы для моделирования в широком интервале температур и в различных газовых средах разнообразных технологических процессов, выявления их недостатков и определения факторов, способствующих совершенствованию процессов.

Методы комплексного термоанализа можно эффективно использовать для исследования и моделирования как процессов формирования, так и эксплуатационных режимов различных изделий, например проводниковых и резистивных элементов толстоплёночных микросборок, элементов керамических, электролитических, оксиднополупроводниковых, плёночных и металлобумажных конденсаторов, позисторов и терморезисторов, интегральных схем, магнитных элементов памяти, приборов оптоэлектроники и др.

Существует много различных методов контроля вязкости материалов, каждый из которых предназначен лишь для определённого интервала значений вязкости - обычно не более 5-6 порядков. Эти методы имеют и другие особенности - большая или меньшая сложность аппаратуры, степень сложности образца, количество материала, необходимое для

единичного измерения, время, затрачиваемое на измерение, его точность и т.д.

Наиболее хорошо изучен и часто применяется для измерения вязкости стёкол вблизи области размягчения метод растяжения нити под действием приложенного усилия. Во время измерения малых вязкостей ($10^9 - 10^{10}$ Пз) нагрузка на образец должна быть минимальной (несколько граммов); при этом необходимо учитывать деформацию образца под действием собственного веса. Область значений вязкости, измеряемой методом растяжения нити, составляет $10^9 - 10^{15}$ Пз. Точность метода обусловлена точностью измерения температуры, так как ошибки в определении размеров образца, нагрузки и скорости деформации обычно не превышают несколько процентов.

Деформация сжатия является обратной величиной по отношению к деформации растяжения. Поскольку прочность стекла на сжатие гораздо выше, чем прочность на растяжение, к образцу можно прикладывать значительные усилия, не опасаясь его разрушения.

Измеряемые значения вязкости достигают $10^{19,5}$ Пз. Образцы изготовляют из любых стёкол, в том числе из тех, из которых вытягивание однородных по диаметру нитей может быть затруднено или даже невыполнимо. Особенно полезным данным метод оказывается при изучении изменения вязкости стекла в процессе его ситаллизации. Метод сжатия можно применять в области $10^8 - 10^{13}$ Пз.

В ходе измерения определяют скорость сжатия образца между двумя параллельно сжатыми пластинами. Ввиду того, что скорость деформации непрерывно изменяется, производится автоматическая запись зависимости деформации от времени.

Для измерения высоких значений вязкости ($10^9 - 10^{17}$ Пз) наиболее удобен метод центрального изгиба стержня. Измерения заключаются в определении скорости изгиба стержня, установленного горизонтально на двух опорах, под действием нагрузки, приложенной к центру образца. Чем больше расстояние между опорами и чем меньше сечение образца, тем большее значение вязкости удаётся измерить. При тщательном изготовлении образцов, точность метода изгиба аналогична точности метода растяжения нити.

Методом вдавливания вязкость определяют по скорости погружения индентора из жаропрочного материала в размягчённое стекло под действием нагрузки. Используя конический индентор, особенно удобно проводить измерения в области $10^7 - 10^{10}$ Пз на малых образцах при непрерывном нагревании со скоростью около 3° С/мин.

Ротационный метод очень популярен для определения вязкости органического связующего, паст и стекла в расплаве. Сущность метода заключается в том, что скорость вращения измерительного тела обратно пропорциональна вязкости стекла при фиксированном вращающем

моменте. Конструкции ротационных вискозиметров весьма разнообразны. Большинство из них позволяют вести измерения в пределах 10^{-5} – 10^5 Пз, но существуют варианты приборов, где верхние пределы измеряемых величин доходит до 10^{10} – 10^{11} Пз.

Ещё одним довольно распространенным методом измерения вязкости композиционных паст и органического связующего является капиллярный метод. Используются различные модификации капиллярных систем и систем датчиков, определяющих время прохождения пасты в капилляре [259]. Контроль органического связующего по коэффициенту преломления осуществляют для идентификации нужной концентрации и чистоты органического связующего. Приборами, служащими для этой цели, являются интерферометры.

7.4. Диагностический неразрушающий контроль элементов и компонентов

Производственный пассивный контроль и контроль готовых МСБ не выявляют скрытых дефектов элементов. В связи с этим часть годных микросборок в процессе эксплуатации может отказать. Для выявления потенциально ненадежных микросборок вводят активный контроль элементов в процессе изготовления и входной ДНК компонентов.

В последние годы получили развитие методы контроля и прогнозирования надежности по информативным параметрам, которые основываются на предположении о существовании стохастической связи между надежностью и начальными значениями совокупности информативных параметров элемента (компонента). Выбор совокупности информативных параметров оказывает решающее влияние на достоверность контроля и приведет к успешному решению поставленной задачи только в том случае, если в исходном наборе такие параметры содержатся. Обеспечение присутствия информативных параметров в исходном наборе возлагается на исследователя и в большинстве случаев является очень сложной задачей [260].

Для успешного решения задачи контроля качества микросборок исходный набор информативных параметров нужно выбирать на основании изучения физических причин, механизмов отказов и подробного анализа видов отказов исследуемых элементов и компонентов. Оценка состояния электrorадиоизделия (элемента-компонента и др.) по нестандартным электрофизическим параметрам получила название электрофизического диагностирования (ЭФД).

Любое электrorадиоизделие (ЭРИ) как объект диагностирования можно представить электрофизической системой, в которой различные

процессы взаимодействия внешне подводимой энергии с материальной средой изделия используются для создания соответствующих функциональных характеристик «вход-выход». В зависимости от способа наблюдения особенностей электрофизических систем различают три основных группы методов ЭФД. Эти группы основаны на наблюдении следующих эффектов:

- 1) рассеянии или диссипации энергии внутри системы и во внешнюю среду;
- 2) внутренних флуктуаций спонтанного типа;
- 3) нелинейности функциональных характеристик.

Сложившаяся практика исследования, разработки и использования методов и средств определила целесообразность классификации методов ЭФД на группы, отличающиеся физическими принципами, положенными в основу этих методов. Группы методов состоят из методов, отличающихся особенностями получения информации. Классификация методов ЭФД приведена в таблице 24 [260].

Группа методов вольт-амперных характеристик (ВАХ) основана на получении, преобразовании и анализе зависимостей токов и напряжений на входе и выходе путем сравнения вида ВАХ исследуемого образца и ВАХ контрольного образца. Методы вольт-фарадных характеристик (ВФХ) основаны на получении и анализе зависимостей емкости элемента под действием внешних воздействий и электрических полей.

С целью определения распределения концентрации носителей заряда, удельного сопротивления, неоднородностей и др. используют методы удельного сопротивления. Они основаны на измерении проводимости; падения напряжения между зондами; напряжения, тока, импеданса емкостного или индуктивного датчика или других электрических величин, характеризующих свойства материалов и структур.

Методы пробивного напряжения позволяют по величине обратного напряжения и току микропробоя выявить дефекты типа структурных неоднородностей, локальных разрушений диэлектрика, загрязнений, нарушений металлизации, которые могут привести к пробоев ЭРИ. Скрытые дефекты, возникающие в ЭРИ при их изготовлении или имеющиеся в материалах, например, дефекты структуры исходного материала, нарушения контактирования, можно выявить с помощью методов шумовых параметров. Методы измерения параметров носителей заряда предназначены для контроля полупроводниковых приборов и микросхем. Эти методы основаны на внешестимулированной генерации носителей заряда. Они позволяют проводить анализ свойств р-п-переходов, границ раздела полупроводник-диэлектрик, структурных и других характеристик материалов.

В микросборках используются ЭРИ, работа которых основана на различных физических принципах. Они существенно отличаются по

конструкции и технологии изготовления. В связи с этим остро стоит задача получения достоверной информации и правильной интерпретации данных о состоянии различных типов ЭРИ.

Среди компонентов МСБ широко распространены полупроводниковые приборы различного функционального назначения –

Таблица 24

Классификация методов электрофизического диагностирования ЭРИ

Группа методов	Методы
1. Вольт-амперных характеристик (ВАХ)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Статических ВАХ 2. Динамических ВАХ 3. Производных ВАХ 4. m- характеристик 5. Нелинейности ВАХ 6. Передаточных характеристик 7. Переходных характеристик 8. Контроль токов утечки
2. Вольтфарадных характеристик (ВФХ)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Статических ВФХ 2. Производных ВФХ 3. Высокочастотных ВФХ 4. Релаксационная спектроскопия глубоких уровней
3. Удельного сопротивления	<ol style="list-style-type: none"> 1. Двухзондовый 2. Трехзондовый 3. Четырехзондовый 4. Высокочастотный 5. Электрометрический
4. Пробивного напряжения	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контроль пробивного напряжения 2. Контроль импульсного напряжения микропробой
5. Шумовых параметров	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сравнение шумовых параметров 2. Измерения шумового напряжения 3. Оценки вероятностных характеристик
6. Измерения параметров носителей заряда	<ol style="list-style-type: none"> 1. Фотоответа 2. Фотоэлектрическая спектроскопия 3. Электролюминесцентного излучения 4. Модуляция проводимости 5. Холловского напряжения 6. Затухания фотопроводимости 7. Фазовый

транзисторы, диоды, стабилитроны, тиристоры и др. Для контроля их качества могут быть использованы различные методы электрофизического диагностирования. Наиболее распространенные методы представлены в таблице 25 [260-270].

Сущность метода наведенного заряда состоит в измерении одного из параметров транзистора ($I_{кб0}$, $I_{кз0}$, $U_{кб0}$ пр., $U_{кз0}$ пр., $I_{21э}$), один из переходов которого, например, коллектор-база, смещен в обратном направлении, под воздействием коронного разряда в воздухе [264, 265]. При наличии значительного подвижного заряда в защитном покрытии под влиянием красного поля р-п-перехода, на который подано обратное смещение, а также электрического поля, созданного с помощью положительного или отрицательного коронного разряда в воздухе, в р- или п-области транзистора могут быть наведены инверсионные слои. Это приводит к появлению канальной проводимости. Характер проводимости определяют по виду ВАХ. Этот метод позволяет выявлять дефекты защитного покрытия типа: прокол окисла, наличие ионов Na^+ , центры захвата.

Плохую посадку кристалла на корпус позволяет выявить метод контроля температуры перегрева транзистора относительно окружающей среды. В этом случае на транзистор подают одиночный импульс мощности и фиксируют значение термочувствительного параметра до и после нагрева [266]. При достаточно малой длительности импульса корпус транзистора служит бесконечным радиатором и при плохом качестве теплового контакта между кристаллом и корпусом переход имеет температуру выше окружающей среды. В качестве термочувствительного параметра здесь используется постоянное напряжение перехода эмиттер-база $U_{эб}$ при прямом включении.

Для контроля транзисторов малой и средней мощности, а также составных транзисторов с защитным диодом между коллектором и эмиттером, можно использовать метод контроля мощности рассеяния. Сущность метода заключается в нагреве транзистора до заданной повышенной температуры при помощи электрического тока и измерения рассеиваемой мощности коллектора P_k , обеспечивающей нагрев транзистора до заданной температуры. Для контроля температуры в качестве термочувствительного параметра используется прямое падение напряжения на переходе эмиттер-база $U_{эб}$, включенном между коллектором и эмиттером составных транзисторов [266].

При этом транзистору, нагретому до заданной температуры T_3 , соответствует определенное значение термочувствительного параметра $U_{эб(кз)нагр}$, которое определяют по формуле:

$$U_{эб(кз)нагр} = U_{эб(кз)нач} - K(T_3 - T_{окр ср}),$$

где $U_{эб(кз)нач}$ - напряжение на переходе эмиттер-база (коллектор-эмиттер) составных транзисторов до нагрева, K - температурный коэффициент напряжения $U_{эб}$.

Таблица 25

**Дефекты, выявляемые в полупроводниковых приборах
методами электрофизического диагностирования**

Выявляемые дефекты	Методы	Контроль зарядовой стабильности коронным разрядом в воздухе	Контроль температуры перегрева перехода	Контроль параметров при нагреве	Контроль времени рассеиваемой мощности	Измерение мощности рассеивания	Измерение теплового сопротивления перехода-корпус	Статических динамических ВАХ	Производных ВАХ	ш-характеристик	ВФХ	Шумовых параметров
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Проколы окисла	+						+	+	+			+
Наличие каналов поверхностной проводимости	+		+					+	+	+		
Наличие генерационно-рекомбинационных центров	+		+					+	+	+		+
Недостаточная толщина покрытия											+	
Плохая посадка кристалла на корпус		+	+	+			+	+				

Таблица 25. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Дефекты структуры			+	+	+		+	+			
Трещины кристалла				+							
Неоднородность лавинного пробоя			+	+	+		+	+	+	+	
Дефекты активных зон					+		+	+	+	+	
Плохое качество разварки выводов							+				
Наличие коррозии, интерметаллидов	+									+	+
Топологические нарушения	+	+	+				+				

Данный метод позволяет выявить дефекты, которые сужают область безопасной работы транзистора (каналы поверхностной проводимости, генерационно-рекомбинационные центры, дефекты структуры).

Выявить производственные дефекты кристалла (дефекты структуры, трещины) или слоя припоя (при плохой посадке кристалла на корпус) позволяет метод измерения времени рассеяния мощности транзисторов. В этом случае определяют интервал времени t_p от момента подачи на транзистор электрической мощности, нормированной по напряжению $U_{кв}$ и току I_b , до момента, предшествующего началу развития вторичного пробоя. Начало развития вторичного пробоя фиксируют по снижению напряжения $\Delta U_{кв}$ относительно заданного на нормируемую величину $U_{кв}$.

Метод применим для оценки устойчивости транзисторов к воздействию определенной мощности в течение заданного времени t_p [267]. Если $t_p < t_{ф}$, то транзистор имеет скрытые дефекты.

Метод контроля по величине теплового сопротивления позволяет выявить дефекты посадки кристаллов в корпус. В основе данного метода лежит регистрация изменений напряжения эмиттер-база $\Delta U_{кв}$ испытуемого транзистора под воздействием ступенчатого изменения рассеиваемой на нем мощности.

В данном случае в цепь эмиттера транзистора, включенного по схеме с общей базой, подается постоянный ток I_b , а на его коллектор — суперпозиция постоянного $U_{кв}$ и импульсного $\Delta U_{кв}$ напряжения, имеющего

форму меандра [266,267]. Этим достигается периодическое ступенчатое изменение мощности, рассеиваемой на коллекторе испытуемого транзистора:

$$\Delta P = \Delta U_{кб} I_3.$$

Изменение температуры транзистора, которое пропорционально изменению рассеиваемой мощности P и тепловому сопротивлению R_T , приводит к изменению напряжения эмиттер-база на величину $\Delta U_{эб}$, регистрируемому в процессе измерений. Качество отвода тепла от кристалла оценивается по величине теплового сопротивления, определяемого по формуле:

$$R_T = \Delta T / \Delta P.$$

Рассматриваемый метод применим для контроля транзисторов средней и большой мощности.

Изменение статических ВАХ позволяет выявить различные дефекты транзисторов, диодов, микросхем, например, трещины, скопления примесей, дефекты защитного покрытия [271]. На рис. 15 приведены основные типы аномальных ВАХ.

Структурные неоднородности, посторонние включения в поверхностном слое p - n - перехода могут привести к локальному повышению градиента напряжения в отдельных зонах перехода. Эти дефекты не изменяют форму прямой ветви ВАХ, но увеличивают крутизну падения обратной ветви (рис. 15.а). Такие дефекты ускоряют процессы деградации перехода и уменьшают напряжение его пробоя. Искажение ВАХ вследствие увеличения токов утечки показано на рис. 15.б. Такое изменение связано с загрязнением поверхности и повышенным содержанием влаги в подкорпусном объеме. «Мягкая» форма обратной ветви ВАХ (рис. 15.в) обычно связана с повышенным содержанием примесей в переходе или его перегревом. Искажение прямого падения напряжения и аномальное изменение прямой ветви ВАХ (рис. 15.г) обусловлено появлением интерметаллических включений в омическом контакте диода или образованием неустойчивого контакта.

Метод динамических ВАХ (в этом случае отражается изменение ВАХ во времени) позволяет выявить особенности процессов, протекающих в обратносмещенных переходах после установления стационарного режима работы. Если подавать на переход импульсы напряжения или пропускать через него импульсы тока, можно получить следующие группы временных характеристик: характеристики коммутационной нестабильности обратных токов переходов, характеристики падения напряжения в обратном направлении прямоуольных импульсов тока, импульсные ВАХ переходов.

В ряде случаев используется метод производных ВАХ. Он основан на аналоговом дифференцировании вольт-амперных или передаточных

характеристик, анализе их формы и расчете требуемых параметров. Первая производная $I'(U)$ соответствует функции распределения площади перехода по значениям локальных напряжений пробоя $U_{пр}$. Вторая производная $I''(U)$ характеризует неоднородность лавинного пробоя. С помощью второй производной ВАХ можно оценивать интегральную структурную неоднородность переходов лавинно-пролетных, импульсных, смесительных и ограничительных диодов, биполярных и полевых транзисторов, стабилитронов, лазерных диодов, фотодиодов.

Метод m – характеристик основан на анализе ВАХ прямосмещенного p-n-перехода [272]. Для реального перехода уравнение прямой ветви ВАХ записывается следующим образом:

$$I = I_0 \exp(eU / mkT),$$

где I – ток p-n-перехода; I_0 – тепловой или обратный ток насыщения; e – элементарный заряд; U – прямое напряжение; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура перехода; m – безразмерный параметр ВАХ, учитывающий отклонение реальной ВАХ перехода от идеализированной.

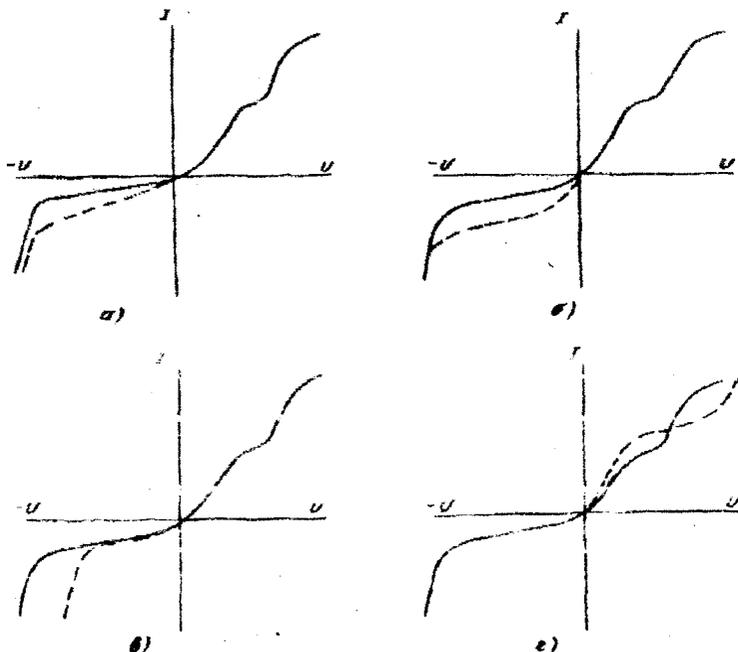


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики p-n-переходов
 а) увеличение крутизны падения обратной ветви, б, в) искажение формы обратной ветви, г) искажение формы прямой ветви

Данный метод позволяет выявлять дефекты, вызывающие повышение обратного тока р-п-переходов кремниевых диодов малой и средней мощности. К потенциально ненадежным обычно относят диоды, у которых $m > 2$. Значению $m \leq 2$ соответствует наличие генерационного тока, значениям $2 \leq m \leq 4$ – наличие каналов проводимости в области перехода, значениям $m > 4$ – наличие обогащенного слоя на высокоомной области.

Сущность метода вольт-фарадных характеристик состоит в измерении изменения емкости полупроводниковых структур во времени (С-*t*) под действием внешних и внутренних полей и оценке на основе этого свойств полупроводниковых структур и элементов. Информативными параметрами метода являются С-*U* и С-*t* характеристики. Этот метод позволяет определять наличие каналов поверхностной проводимости, оценивать концентрацию и профиль распределения носителей заряда по глубине слоя, потенциал и емкость плоских зон в МДП – структурах, время жизни неосновных носителей заряда и другие электрофизические параметры [273].

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) наиболее часто измеряются в диапазоне частот 1...10 МГц при относительно медленно изменяющемся смещении. Методика экспериментального определения этих характеристик предусматривает изменение емкости на основе закона Ома для емкостной или активно-емкостной цепи при достаточно малом синусоидальном напряжении на измеряемом элементе.

Очень часто используют метод контроля качества ЭРИ по шумовым параметрам [274, 275]. Шумовые параметры несут важную информацию о качестве ЭРИ. Шумы можно рассматривать как флуктуации (относительно небольшие, случайные изменения во времени) активной, реактивной или комплексной проводимости при подаче на элемент постоянного, синусоидального или импульсного напряжения. В общем спектре шумов наиболее важную информацию о качестве элементов несут две составляющие: первая – контактный шум, вторая – лавинный шум [260].

На практике наибольшее применение нашел контроль качества по величине контактного шума. Этот шум обнаружен в различных элементах: резисторах, конденсаторах, контактных устройствах, полупроводниковых и электровакуумных приборах. Соответственно он имеет различные названия: токовый, шум $1/f$, избыточный, контактный, мерцания, фликкер-шум, модуляционный, низкочастотный [276-281].

Проблема шума $1/f$ концентрирует в себе ряд сложных нерешенных вопросов. В первую очередь, это вопрос о его физической природе [282-285]. Одна из трудностей объяснения $1/f$ – шума в широкой частотной

области заключается в том, что он требует широкого распределения времени релаксации.

Фликкер-шумы вызываются структурной неоднородностью областей, по которым протекает ток, нестабильностью и зернистостью структуры этого объема. При протекании тока по таким областям происходит локальная перестройка отдельных участков структуры, некомпенсируемые скачкообразные повышения проводимости в одних и понижения проводимости в других зонах объема. Это вызывает флуктуации общей проводимости.

Существует большое разнообразие процессов, способных давать вклад в спектральную плотность вида $1/f$ на различных участках спектра. Среди них: захват носителей ловушками, диффузия, рекомбинация, флуктуации поверхностного потенциала, высота барьера, туннелирование и др. [279].

Фликкер-шумы преобладают на низких частотах (до 1-2 кГц). На более высоких частотах (более 1,5 кГц) шумы определяются главным образом тепловыми и дробовыми составляющими.

В ряде случаев информативным является лавинный шум. Обычно он связан с тем, что при грубокристаллической, неустойчивой структуре в области протекания тока или нестабильном контакте создаются локальные повышения градиентов напряжений и возникают микроплазменные области, в которых реализуется режим электрического пробоя. Случайные изменения объема, «включения» и «выключения» этих областей в пути протекания тока вызывают изменения интенсивности лавинного шума. Они могут быть обусловлены флуктуациями контактного давления, мгновенными перегревами и другими нестационарными тепловыми процессами в микрообъемах носителей тока в емкостных и резистивных неоднородностях структуры.

Для р-п-переходов повышение уровня лавинного шума наблюдается обычно при работе в предпробойном режиме. Лавинный шум проявляется в виде всплесков спектральной плотности мощности на относительно высоких частотах.

Шумы оцениваются по следующим характеристикам: среднее и действующее значения напряжения и тока, средняя мощность, спектральная плотность мощности шума, плотность вероятности мгновенных значений шума, интегральный коэффициент шума.

Общим недостатком методов контроля качества ЭРИ по уровню шумов является малая повторяемость результатов измерений даже на одном рабочем месте. Это объясняется тем, что при измерениях оцениваются флуктуации, амплитуда которых может изменяться в весьма широких пределах. Кроме того, аппаратура подвержена влиянию различных помех, особенно низкочастотных электромагнитных.

Практика показывает, что метод контроля по уровню шумов позволяет выявлять только некоторые типы дефектов и эффективен не для всех типов

приборов. Решение о практическом использовании этих методов можно принимать только после подтверждения их пригодности для выявления дефектов конкретных типов ЭРИ [260].

В микросборках с нерегулярной структурой широко используются различные типы аналоговых и цифровых микросхем, как бескорпусных, так и корпусированных. Для контроля качества ИМС могут быть использованы большинство ранее рассмотренных методов. Однако конструктивно-технологические особенности ИМС привели к необходимости модернизации ряда методик контроля полупроводниковых приборов, к созданию новых, более эффективных методов. В таблице 26 приведены данные о методах контроля ИМС [287-292].

Физическая сущность метода контроля формы динамического тока потребления в шине питания состоит в том, что при подаче динамических тестовых воздействий происходит переключение логических элементов (групп элементов) микросхем из состояния логического нуля в состояние логической единицы или наоборот. Это вызывает переходный процесс тока потребления, который отражается на форме динамического тока потребления. Наличие аномалий в форме динамического тока потребления по сравнению с контрольными образцами микросхем при одинаковых комбинациях тестовых воздействий свидетельствует о наличии в ИМС скрытых дефектов.

Метод контроля параметров ИМС при пониженном напряжении питания позволяет выявлять внутрисхемные утечки, недостаточную нагрузочную способность выходных транзисторов, дефекты фотолитографии и защитного покрытия. При уменьшении напряжения питания увеличивается чувствительность выходных параметров ИМС к скрытым дефектам. Контроль производится путем измерения статических параметров $U_{\text{вых}}^0$ и $U_{\text{вых}}^1$ при номинальном и пониженном напряжении питания. Годными считаются такие микросхемы, у которых разница значений выходных напряжений не превышает критических величин.

Сущность метода контроля электрических параметров микросхем в микротоковом режиме состоит в измерении токов контактных узлов и токов утечки ИМС в таких режимах, при которых внутренние дефекты в наибольшей степени влияют на измеряемый параметр. Так для бездефектных ИМС напряжение составляет 1,2...2В. При этом контролируемый ток обычно больше 1 мкА. Если ток в цепи проверяемого вывода будет меньше 1 мкА, то такая ИМС бракуется.

Таблица 26

Методы электрофизического диагностирования ИМС

№ пп.	Метод	Назначение, выявляемые дефекты	Параметр-критерий годности	Применимость к группам и типам ЭРИ
1	2	3	4	5
1	Метод контроля формы динамического тока потребления в пине металлизации	Короткие замыкания из-за проколов в окисле, электромиграция, коррозия, зарядовая нестабильность, ионное загрязнение	Форма динамического тока потребления во временной или спектральной областях	ИС всех типов, ТТЛ, МОП, И ² Л на пластинке
2	Метод контроля параметров при пониженном напряжении питания	Температурная стабильность выходных параметров, утечки, недостаточная нагрузочная способность выходных транзисторов, дефекты фотолитографии и защитного покрытия	$U^0_{\text{вых}}$ и $U^1_{\text{вых}}$ при критических малых напряжениях питания. $U^0_{\text{вых}} \leq (\Delta U^1_{\text{вых}})^*$ $U^0_{\text{вых}} \geq (\Delta U^1_{\text{вых}})^*$ при пониженном $E_{\text{пит}}$	Все типы ТТЛ и ЭСЛ ИС малой и средней интеграции на пластине и готовых ИС
3	Метод контроля параметров в микротоковом режиме	Качество р-п-переходов и изоляции по токам утечки. Качество контактных соединений. Короткие замыкания	$I_{\text{ут}} \leq 1-3 \text{ мкА}$ при $U_{\text{пит}} = \text{const}$ $I_{\text{контакт}} \geq 1 \text{ мкА}$ при $U_{\text{пит}} = \text{const}$	ИС ТТЛ малой и средней интеграции
4	Метод определения критической величины дополнительного сопротивления в цепи питания	Качество контактных соединений, фотолитографии, окисла	$R_{\text{кр}}$ в цепи питания до наступления сброса $R_{\text{кр}} \geq (R_{\text{кр}})^*$	МОП и КМОП БИС, ОЗУ

Таблица 26. Продолжение

1	2	3	4	5
5	Метод контроля ВАХ в характеристических точках	Загрязнения на кристалле, качество контактных соединений, фотолитографии, окисных слоев	$I_{p-n} \leq (I_{p-n})^*$ $I_{yt} < (I_{yt})^*$ $(U_{p-n})_1 \leq U_{p-n} \leq (U_{p-n})_2^*$	ИС, ТТЛ, 134ЛБ1, 133ЛА1, 133ЛА2, 134ЛБ1А, 134ЛБ2А
6	Метод контроля обратного тока переходов	Контроль границы раздела «кремний-окисел» на наличие в нем примесей, однородности поверхности и толщины	$I_{обp} \leq (I_{обp})^*$	ИС, ТТЛ малой и средней интеграции
7	Метод контроля суммарного потакового (побитового) типа потребления	Зарядовая нестабильность границы раздела «кремний-окисел»	$I_{пот} \leq (I_{пот})^*$ $U_{вых}^0 \leq (U_{вых}^0)^*$ $U_{вых}^1 \geq (U_{вых}^1)^*$	КМДП ИС малой, средней и большой интеграции, кроме ОЗУ
8	Метод контроля по характеристикам	Качество p-n перехода (поверхность и объем) по увеличению тока, связанного с рекомбинационно-генерационными центрами	$m < (m)^*$ Форма m-характеристик	ИС, ТТЛ, ИС 149КТ1В, ИС 134ЛБ1А
9	Метод контроля пороговых напряжений по ВФХ	Качество p-n-перехода – стабильность пороговых напряжений	Форма и параметры ВФХ $U_{пер} \leq (\Delta U_{пер})^*$	МОП, КМОП ИС

Таблица 26. Окончание

1	2	3	4	5
10	Метод определения скрытых дефектов по динамическим неравновесным характеристикам (ДНВАХ)	Качество границы раздела «полупроводник-окисел» и окисла. Обнаружение локальных участков с повышенной проводимостью, примесей, загрязнений поверхности	Генерационное время жизни носителей $\tau_{ge} \geq (\tau_{ge})^*$ Форма ВАХ	Пластины со сформированными тестовыми МОП-структурами
11	Метод контроля качества диэлектрических пленок по напряжению пробоя		$U_{пр} \rightarrow U_c$, при $I > 0$	МОП-структуры

* - критическое значение параметра U

Метод определения критической величины дополнительного сопротивления в цепи питания позволяет выявлять дефекты контактных соединений, металлизации, фотолитографии, окисной пленки. О качестве ИМС и стабильности техпроцесса ее изготовления судят по величине постоянной времени записи информации. Завышенные значения τ , приводят к увеличению задержек сигналов ИМС, что свидетельствует о ее дефектности.

Выявить загрязнения на поверхности кристалла, дефекты контактных соединений, фотолитографии, окисных слоев в ТТЛ ИМС позволяет метод контроля параметров ВАХ в характеристических точках.

Сущность метода состоит в измерении значений токов и напряжений в тех точках ВАХ, в которых влияние возможных внутренних дефектов является наибольшим. Образцы, у которых значения токов и напряжений существенно больше или меньше их средних значений, бракуются. Так, для ИМС 134ЛБ1 допустимое значение прямого тока при прямом напряжении величиной 0,5 В составляет 0,01...2,5 мкА.

Основным элементом ненадежности ИМС является граница раздела кремний-двуокись кремния. Для оценки ее качества часто используют метод контроля обратного тока р-п-перехода. Предельная величина тока

находится в пределах десятки нА – сотни мкА. Эта величина устанавливается по испытательной выборке ИМС.

Метод контроля суммарного потактового (побитового) тока потребления позволяет выявить зарядовую нестабильность границы раздела полупроводник-диэлектрик. В этом случае производят измерение суммарного тока потребления во всех логических состояниях ИМС до и после испытаний их в статическом режиме при повышенной температуре. Величина тока утечки, определяемая конструктивно-технологическими особенностями ИМС, может изменяться от десятков нА до десятков мкА. Это свидетельствует о необходимости определения норм годности для каждого типоминимала ИМС.

Физическая сущность контроля ИМС по m -характеристикам не отличается от ранее рассмотренной для транзисторов и диодов. При контроле ИМС m -параметр характеризует не только свойства p - n -перехода, но и резистивных цепей, подключенных параллельно или последовательно. Потенциально ненадежными считаются такие образцы, к которых m - характеристика вышла за пределы базовой области. Базовая область устанавливается для конкретных типоминималов ИМС путем проведения испытаний выборок объемом не менее 50 штук.

При проведении контроля данным методом необходимо, чтобы напряжение, подаваемое на p - n -переходы с помощью измерительных средств, превышало напряжение их отпирания. Однако в ИМС всегда имеются цепи с параллельно и последовательно включенными резисторами. Это сужает диапазон токов, при которых проявляются информативные свойства m - характеристики.

В ряде случаев качество ИМС оценивают по стабильности пороговых напряжений. В этом случае измеряют напряжение инверсии на ВФХ, полученных на адресных входах, а также на других цепях. Оценка качества производится путем сравнения и расшифровки ВФХ, снятых до и после термотренировки. Снятие ВФХ производится с растяжкой верхней части шкалы емкостей.

Под действием электрического поля и температуры в диэлектрике происходит перераспределение и генерация подвижного заряда, что приводит к изменению ВФХ. Некоторые дефекты ИМС можно оценивать по форме и степени отличий ВФХ.

Метод динамических неравновесных вольт-амперных характеристик (ДНВАХ) позволяет обнаружить локальные участки с повышенной проводимостью в окисле, наличие аморфизированного слоя кремния, дефекты поверхности полупроводника, атомы примеси и их распределение по поверхности образца. Сущность метода состоит в определении неоднородностей генерационно-рекомбинационных характеристик границы раздела «диэлектрик-полупроводник». В качестве

информативного параметра используется эффективное генерационное время жизни неосновных носителей τ_{q1} .

Величина этого времени характеризуют скорость образования равновесного инверсного слоя в МДП-структурах, поверхность которых обеднена основными носителями в результате приложения инвертирующего неравновесного смещения. Скрытые дефекты границы раздела «полупроводник – диэлектрик» ведут в возрастанию плотности генерационно-активных центров. При этом величина τ_{q1} уменьшается.

Качество диэлектрических слоев МДП-структур можно контролировать по напряженно их пробоя. Сущность метода состоит в том, что на испытуемую структуру подается однократный импульс напряжения малой длительности (менее 1 мкс) и регистрируется амплитуда импульса, при которой появляется ток микропробоя.

В микросборках широко распространены конденсаторы как в виде пленочных структур, так и в виде компонентов. Поэтому при производстве МСБ важно иметь эффективные методы и средства производственного ДНК пленочных конденсаторов и входного ДНК дискретных конденсаторов.

В качестве информативных параметров при оценке потенциальной надежности дискретных конденсаторов обычно используются:

- для оксиднополупроводниковых конденсаторов – коэффициент нелинейности $K_{нел}$;

- для электролитических и оксиднополупроводниковых – эквивалентное последовательное сопротивление $R_{экв}$;

- для пленочных металлизированных (полистирольных, полиэтилентерефталтных, поликарбонатных, лакокрасочных) конденсаторов – эквивалентное последовательное сопротивление, измеренное на одной из частот ряда – 10, 20, 50, 100, 200 кГц;

- для фольговых полиэтилентерефталтных конденсаторов – пороговое напряжение шума $U_{ш пор}$

Нормы забракования устанавливаются на основе испытания выборки конденсаторов объемом обычно не менее 100 шт.

Основные виды дефектов конденсаторов, которые могут быть выявлены при использовании перечисленных информативных параметров, приведены в таблице 27.

Физическая сущность методов ЭФД конденсаторов рассмотрена в работах [260, 293-300].

Метод контроля качества по величине коэффициента нелинейности используется для оксиднополупроводниковых конденсаторов. В этом случае на конденсатор подают чисто синусоидальное напряжение U_1 . С помощью измерителя нелинейности определяют напряжение третьей гармоники U_3 . Коэффициент нелинейности определяется как отношение:

$$K_{нел} = U_3 / U_1.$$

Физической основой метода является наблюдаемое при наличии дефектов катодных переходных или контактных покрытий в цепях конденсаторов возрастание напряжения третьей гармоники, значительно превышающей амплитуду гармоник более высоких порядков.

$K_{\text{зв}}$ является интегральной характеристикой качества конденсаторов.

Контроль качества алюминиевых электролитических конденсаторов типа К50 и оксиднополупроводниковых конденсаторов типа К53 можно проводить по величине эквивалентного последовательного сопротивления. В этом случае выделяется активная составляющая полного сопротивления конденсатора. У оксиднополупроводниковых конденсаторов эквивалентное сопротивление включает следующие составляющие: $R_{\text{зв}} = R_0 + R_{\text{мп}} + R_x$.

где R_0 – сопротивление потерям в оксидной пленке;

$R_{\text{мп}}$ – сопротивление полупроводника MnO_2 в порах анода;

R_x – сопротивление контактов и переходных покрытий.

Эквивалентное последовательное сопротивление алюминиевых электролитических конденсаторов имеет те же составляющие. Вместо $R_{\text{мп}}$ здесь присутствует сопротивление электролита R_e . Физической основой данного метода является неравномерное распределение мощности потерь по объему конденсатора при работе в цепях с повышенной пульсацией и в импульсных режимах в зависимости от активного сопротивления компонентов конденсатора. Метод диагностического контроля качества пленочных металлизированных конденсаторов по величине эквивалентного последовательного активного сопротивления (ЭПАС) является разновидностью метода контроля по величине внутреннего сопротивления. Он заключается в измерении активного сопротивления конденсаторов по последовательной схеме замещения косвенным методом амперметра-вольтметра.

ОППК – оксиднополупроводниковые конденсаторы; КОД – конденсаторы с оксидным диэлектриком; ПМК – пленочные металлизированные конденсаторы; ФПК – фольговые полиэтиленерефталдные конденсаторы; СС – сварные соединения

Сущность метода заключается в следующем. При работе конденсатора в цепях переменного тока повышенной частоты и в импульсных режимах имеет место неравномерное распределение мощности потерь по объему конденсатора и ее локализация в зависимости от активного сопротивления элементов его конструкции. Если конденсатор имеет повышенное значение ЭПАС, то на его конструктивных элементах, например, на торце секции при некачественном контактном узле, происходит локальный перегрев. Это приводит к разрушению диэлектрика и, как следствие, к снижению сопротивления изоляции, росту тангенса угла потерь и последующему пробое конденсатора.

Метод порогового напряжения шума эффективен для выявления посторонних включений в диэлектрике, инородных частиц между витками

Таблица 27

Дефекты, выявляемые в конденсаторах методами электрофизического диагностирования

Выявляемые дефекты	Методы	Измерение коэффициента нелинейности $K_{нел}$	Измерение эквивалентного последовательного сопротивления, $R_{эв}$	Измерение эквивалентного последовательного активного сопротивления (ЭПАС)	Измерение порогового напряжения шума	Контроль сварных соединений по ИК-излучению
Дефекты катодных переходных и (или) контактных покрытий		ОПМК		ПМК		
Частотная нестабильность емкости		ОПМК				
Дефект контактных соединений			КОД			
Высыхание электролита			КОД			
Дефекты сварки выводов на конструкции изделия			КОД	ПМК		СС
Наличие флоса между свободной секцией и корпусом			КОД			
Наличие влаги внутри корпуса			КОД			
Нарушение состава лако-сажевой суспензии			КОД			
Нарушение металлизированных обкладок				ПМК		
Посторонние включения в диэлектрике					ФПК	
Заусенцы на фольговых обкладках					ФПК	
Разнотолщинность диэлектрика					ФПК	

секции, заусеницы на обкладках, разнотолщинности диэлектрической пленки, сквозных отверстий в слое диэлектрика у фольговых полиэтилентерефталатных конденсаторов. Конденсатор должен находиться в предпробойном состоянии. Для этого на него подают испытательное напряжение постоянного тока, которое линейно возрастает в течение 10 ± 2 с до утроенного напряжения. При этом на конденсаторе возникает переменное напряжение, обусловленное флуктуациями на дефектах диэлектрика. Это напряжение называют шумовым. При превышении шумового напряжения установленного порогового уровня производят отключение испытательного напряжения. Это напряжение регистрируется цифровым вольтметром и называется пороговым $U_{пор}$.

Для контроля качества сварных соединений конструкций конденсаторов можно использовать метод инфракрасного (ИК) излучения. В этом случае производит импульсный нагрев области сварного соединения с помощью сварного тока (в процессе сварки) или контрольного тока (после сварки). При этом контролируют уровень ИК-излучения. Уровень излучения зависит от величины контактного сопротивления сварного соединения. Высокий уровень ИК-излучения свидетельствует о повышенном сопротивлении и низком качестве сварного соединения.

Самыми распространенными элементами МСБ являются резисторы. Качество пленочных резисторов фактически определяет качество пассивной части микросборки.

Для контроля качества пленочных и дискретных резисторов используются различные методы. Наиболее распространенные представлены в таблице 28.

Хорошо известен метод контроля качества резисторов по шумовым характеристикам [301-304]. При наличии в резисторе дефектов в нем возникают флуктуации тока. Это является условием генерации радиочастотного шума. Электрические шумы можно разделить на тепловые, дробовые и избыточные [260]. Основную информацию о наличии дефектов несет избыточный шум.

Обесточенный резистор обладает определенным уровнем теплового шума. Если через резистор пропустить электрический ток, то в нем возникают токовые шумы. Они являются избыточными по сравнению с тепловыми. Такие шумы характерны для резисторов с зернистой структурой резистивного слоя.

Интенсивность токовых шумов в низкочастотном диапазоне (до 2-3 кГц) превышает интенсивность тепловых.

Токовый шум может нести информацию о дефектах основания или подложки (трещины, риски), неоднородностях резистивного слоя, плохом контакте резистивного слоя с выводами. Для оценки потенциальной

ненадежности резисторов часто используют метод измерения уровня нелинейности [305-308]. Идеальный резистор имеет линейную ВАХ. Композиционные, керметные и аналогичные резисторы с аморфной или

Таблица 28

Дефекты, выявляемые электрофизическими методами в резисторах

Выявляемые дефекты	Методы	Метод измерения коэффициента шума	Метод измерения нелинейности	Метод переходных тепловых характеристик	Метод контроля равномерности распределения сопротивления	Метод контроля контактного сопротивления переменных резисторов
Раковина, скол, пористость, трещина, паразитная проводящего покрытия		+	+	+	+	+
Плохая адгезия проводящего покрытия				+	+	
Загрязнения проводящего покрытия		+			+	+
Недорез резистивного слоя				+		
Неоднородность резистивного слоя		+	+	+	+	+
Нарушение состава резистивного слоя				+		+
Плохой контакт в контактном узле		+	+	+		+
Раковина, скол, пористость, трещина, паразитная подложки			+	+		+

полукристаллической структурой имеют омическую нелинейность. Наличие дефектов приводит к увеличению нелинейности таких резисторов.

Нелинейность объясняется существованием потенциальных барьеров. Их образование связано с нарушением энергетических уровней атомов. Основными источниками нелинейности пленочных резисторов является случайное множество нелинейных переходов, распределенных по всему объему проводящего материала между отдельными зернами с металлическими, полупроводниковыми и диэлектрическими свойствами.

Нелинейность чаще всего оценивают по уровню 3-ей гармоники.

Сущность метода контроля по переходным тепловым характеристикам состоит в измерении динамического сопротивления резистора при его нагреве импульсом постоянного тока [295, 309, 310]. Переходные процессы, протекающие в резистивном слое, в контактных узлах, основании (подложке) характеризуются следующими константами: электрической постоянной времени τ_e и временем запаздывания τ_d . Их используют в качестве информативных параметров для выявления дефектов типа примесей и неоднородностей резистивного слоя, сколов и микротрещин основания, косо́й посадки колпачка на основание. Дополнительными информативными параметрами могут служить качественные параметры: линейность, монотонность, гладкость, крутизна, периодичность, непрерывность переходной тепловой характеристики (ПТХ).

В ряде случаев эффективен метод контроля равномерности распределения сопротивления резистора. Он основан на измерении градиента напряжения вдоль резистивной ленты неокрашенного нарезанного резистора четырехзондовым электроконтактным методом. К выводам неокрашенного резистора прикладывается некоторое эталонное напряжение постоянного тока и двумя потенциальными щупами, находящимися на расстоянии друг от друга, измеряют разность напряжений между некоторым комплексирующим напряжением и падением напряжения между щупами. Разность падений напряжений на контролируемом и эталонном участках резистора является информативным параметром. Данный метод позволяет выявлять плохую адгезию, неравномерность нанесения резистивного слоя, дефекты типа параллельных сколов, инородных включений и загрязнений [295].

Для переменных резисторов используется метод контроля переходного сопротивления. Он основан на контроле плавности изменения сопротивления резистора и переходного контактного сопротивления при вращении подвижной системы от упора до упора при прямом и обратном ходе. Контактное сопротивление может быть оценено количественно по величине максимального, минимального и среднего значения сопротивления [260].

Широкое распространение в космических РЭС получили коммутационные изделия типа электромагнитных реле и переключателей.

Основные методы ЭФД электромагнитных реле (ЭМР) по наиболее распространенным скрытым производственным дефектам приведены в таблице 29.

Наибольшее число отказов ЭМР обусловлено дефектами контактного узла и электромагнитной системы [311-320]. Тонкие органические и неорганические пленки, образующиеся на поверхности контактов являются причинами возникновения перемежающихся отказов, которые проявляются в нарушении контактирования с последующим самоустраниением. Для выявления таких дефектов используют методы прямого измерения контактного сопротивления, нелинейных ВАХ.

Однако первый метод не обеспечивает выявления дефектов, приводящих к нестабильности контактного сопротивления [311]. Более эффективным в этом случае является метод ВАХ. Контроль контактов методом ВАХ основан на физических явлениях прохождения тока через тонкие пленки, образующиеся на их поверхности. При плавном повышении напряжения, подаваемого на контакты, величина напряженности электрического поля в пленке изменяется. В зависимости от величины напряженности поля и проводимости пленки изменяется ток, протекающий через контактную пару. Идеальный контакт имеет линейную ВАХ. При наличии на поверхности контактов пленок, изменяющих проводимость, будем иметь нелинейную ВАХ [314].

Для контроля качества электромеханической системы часто используют осциллографический метод. Изменение тока в обмотке реле во времени характеризует динамику переходного процесса притяжения и отпускания якоря реле. В данном случае на экране осциллографа фиксируют токи срабатывания и отпускания. Если характер изменения токов во времени отличается от образцовой осциллограммы, то такое реле имеет дефекты сборки электромеханической системы [315].

Для контроля качества герконов можно использовать акустические параметры. В качестве информативного параметра используют спектр механических колебаний при коммутации геркона [316]. Однако получить устойчивые, стабильные спектры частот во многих случаях очень трудно. Это объясняется тем, что помимо свободных механических колебаний, существующих при разомкнутых контактах, появляются новые частоты, величина которых зависит от качества контактирующих поверхностей. Каждый геркон в этом случае имеет свой образ [317].

Попытки использования фототеневого метода [318] не дали существенного улучшения достоверности контроля, т.к. этот метод не позволяет регистрировать собственные частоты симметричных и косимметричных колебаний

Дефекты, выявляемые в электромагнитных реле и герконах методами электрофизического диагностирования

Выявляемые дефекты	Методы																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	Измерения сопротивления обмотки при изменении температуры																	
	Подключение обмотки в резонансный контур																	
	Третьей гармоники тока в обмотке																	
	Осциллографический																	
	ВАХ контактов																	
	Сопротивления контактов																	
	Измерения движения якоря при отпускании																	
	Измерения характера тока в обмотках																	
	Тахометрического измерения силы нажатия (герконы)																	
	Сравнения магнитных потоков при насыщении и отпускании																	
	Электрического реактанса																	
	Измерения емкости контактов																	
	Измерения магнитной проводимости зазора (герконы)																	
	Индуктированной ЭДС																	
	Отчета интервалов времени дрейфа контактов и якоря																	
	Оценки влажности осушенного воздуха внутри объема реле																	
	Генерируемого акустического радиочастотного шума																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1. Дефекты обмоток и соединения их с выводами	+	+	+															
2. Дефекты сборки и регулировки				+													+	
3. Загрязнения контактов				+	+	+												

Таблица 29. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4. Дефекты токовой системы				+													
5. Затирания якоря				+	+	+											
6. Аномальное контактное нажатие				+	+		+	+	+	+							
7. Аномальная величина контактного зазора											+	+	+	+			
8. Дребезг				+												+	
9. Качество герметизации																	+
10. Обрывы соединений																	+

В работе [319] исследован способ механического возбуждения одного из выводов геркона с помощью пьезодагчика напряжением синусоидальной формы. На другом выводе устанавливался пьезоприемник. С него снималось напряжение, пропорциональное амплитудам свободных и вынужденных колебаний. Наиболее информативной является вторая гармоника симметричных колебаний, лежащая в диапазоне 1900-3000 Гц.

8. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА МСБ

8.1. Оптимальная оценка значения прогнозируемого параметра

Пусть начальное состояние изделия оценивается k признаками, каждый из которых является случайной величиной. Обозначим эту совокупность k случайных величин

$$\{x_i\} = x_1, x_2, \dots, x_k.$$

По конкретным значениям признаков $x^{(j)}_1, x^{(j)}_2, \dots, x^{(j)}_k$ j -го экземпляра необходимо найти оценку значения прогнозируемого параметра $y^{*(j)}(t_{\text{пр}})$ к моменту времени $t_{\text{пр}}$, которую для простоты обозначим $y^{*(j)}$.

Задачу прогнозирования значения параметра по признакам имеет смысл ставить только в том случае, когда каждый из признаков x_i и прогнозируемый параметр y являются зависимыми случайными величинами. Степень их зависимости полностью определяется видом $w(y, x_1, x_2, \dots, x_k; t_{\text{пр}}, t_1)$ — многомерной совместной плотности распределения значений признаков $\{x_i\}$ и прогнозируемого параметра y , которую для простоты будет обозначать далее как [321]

$$w(y, x_1, x_2, \dots, x_k). \quad (9)$$

Если прогнозируемый параметр с каждым из признаков независим, то прогнозирование теряет смысл, и эта многомерная плотность распределения выражается в произведение одномерной плотности значений прогнозируемого параметра $w(y)$ и совместной плотности распределения признаков:

$$w(y, x_1, x_2, \dots, x_k) = w(y) \cdot w(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Прогнозирование должно быть более точным, в качестве количественной меры точности естественно взять дисперсию ошибки ($y - \bar{y}$) в оценке прогнозируемого параметра. Здесь \bar{y} — оценка параметра y . Тогда критерий оптимальности имеет вид

$$D[y - y_{\text{опт}}] \rightarrow \min, \quad (10)$$

где $y_{\text{опт}}$ — оптимальная оценка параметра y .

Интегрируя выражение (9) по переменной y в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, получим k -мерную плотность совместного распределения признаков:

$$w(x_1, x_2, \dots, x_k) = \int_{-\infty}^{\infty} w(y, x_1, x_2, \dots, x_k) dy.$$

Тогда условная плотность распределения прогнозируемого параметра y при условии, что признаки – случайные величины x_1, x_2, \dots, x_k – приняли некоторые значения x_1, x_2, \dots, x_k , равна

$$w(y/x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{w(y, x_1, x_2, \dots, x_k)}{w(x_1, x_2, \dots, x_k)} \quad (11)$$

Если теперь для какого-либо j -го экземпляра измерить значения признаков $x^{(j)}_1, x^{(j)}_2, \dots, x^{(j)}_k$ и подставить эти значения в выражения (11), то получим условную плотность распределения прогнозируемого параметра для этого j -го экземпляра при условии, что признаки x_1, x_2, \dots, x_k приняли именно эти измеренные значения соответственно $x^{(j)}_1, x^{(j)}_2, \dots, x^{(j)}_k$:

$$w(y/x^{(j)}_1, x^{(j)}_2, \dots, x^{(j)}_k) \quad (12)$$

Эта плотность есть функция одной переменной y .

Дисперсия, вычисленная по (12), будет меньше дисперсии, вычисленной по одномерной плотности $w(y)$, и различие между ними будет тем существеннее, чем сильнее зависимость между каждой из случайных величин совокупности x_i и прогнозируемым параметром y , а также чем менее при этом x_i зависимы между собой.

В качестве оценки $y^{(j)}$ прогнозируемого параметра $y^{(j)}$ берется наиболее вероятное значение случайной величины y – ее мода, т.е. такое, при котором плотность распределения (12) максимальна. Эта оценка удовлетворяет критерию оптимальности (10), т.е. является оптимальной оценкой прогнозируемого параметра j -го экземпляра. Обозначим ее $y^{(j)*}_{\text{опт}}$. Таким образом, прогнозирование оптимально, когда оценка $y^{(j)*}_{\text{опт}}$ находится из выражения

$$w(y/x^{(j)}_1, x^{(j)}_2, \dots, x^{(j)}_k) \rightarrow \max.$$

8.2. Оптимальная классификация

Задача заключается в отыскании способа принятия оптимального решения о принадлежности проверяемого экземпляра к тому или другому классу в условиях неопределенности, т.е. в условиях действия тех случайных факторов, которые маскируют связь между признаками и классом экземпляра. Условимся, что проверяемый экземпляр принадлежит к классу K_1 , если значение прогнозируемого параметра y к моменту времени $t_{\text{пр}}$ будет больше некоторого граничного значения $y_{\text{гр}}$, т.е. $y \geq y_{\text{гр}}$. Будем считать такие изделия годными. Если $y < y_{\text{гр}}$, экземпляр принадлежит к классу K_2 – дефектных [322].

Зная плотность распределения $w(y)$ прогнозируемого параметра на момент времени $t_{пр}$, можно определить так называемые априорные вероятности принадлежности какого либо экземпляра к классу K_1 :

$$P(K_1) = \int_{y_{пр}}^{\infty} w(y) dy$$

и к классу K_2 :

$$P(K_2) = \int_{-\infty}^{y_{пр}} w(y) dy$$

Пусть начальное состояние изделия характеризуется k признаками, каждый из которых является случайной величиной. Совокупность k случайных величин обозначим $\{x_i\} = \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k$.

По конкретным значениям признаков $\{x_i^{(j)}\}$ j -го экземпляра необходимо принять решение об отнесении этого экземпляра к классу K_1 или K_2 .

В таком виде задачу целесообразно ставить лишь в том случае, когда между классом, к которому принадлежит j -й экземпляр, и значениями его признаков существует какая-либо связь. Если эта связь выражается в виде гибкой функциональной зависимости, то, очевидно, для определения принадлежности экземпляра к тому или другому классу следует произвести расчет по вполне определенной формуле.

В задачах прогнозирования предполагается наличие вероятностей связи между классом и признаками j -го экземпляра. Степень тесноты этой связи полностью определяется видом условных совместных плотностей распределения признаков $\{x_i\}$ при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1 - $w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1/K_1; t_{пр})$ и классу K_2 - $w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1/K_2; t_{пр})$. Для простоты записи далее будем обозначать их как: $w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1/K_1)$ и $w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1/K_2)$. С совместной плотностью $w(x_1, x_2, \dots, x_k, y)$ они связаны соотношениями:

$$w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1/K_1) = C_1 \int w(x_1, x_2, \dots, x_k, y) \phi y; \quad (13)$$

$$w(x_1, x_2, \dots, x_k; t_1 / K_2) = C_2 \int_{-\infty}^{y_{gp}} w(x_1, x_2, \dots, x_k, y) dy; \quad (14)$$

где C_1, C_2 - нормирующие коэффициенты,

$$C_1 = \frac{1}{P(K_1)} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{y_{gp}} w(x_1, x_2, \dots, x_k, y) dx_1 dx_2 \dots dx_k dy \right]^{-1};$$

$$C_2 = \frac{1}{P(K_2)} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x_1, x_2, \dots, x_k, y) dx_1 dx_2 \dots dx_k dy \right]^{-1}.$$

Принятие решений об отнесении экземпляра к конкретному классу основано на вероятностных методах, т.е. существует вероятность принятия ошибочных решений. Выясним вероятности ошибочных решений. Введем следующие обозначения:

$P(\text{реш. } K_2 / K_1)$ - условная вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу K_2 при условии, что он фактически принадлежит к классу K_1 ;

$P(\text{реш. } K_1 / K_2)$ - условная вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу K_1 при условии, что в действительности этот экземпляр принадлежит к классу K_2 ;

$P(K_1 / \text{реш. } K_2)$ - условная вероятность того, что экземпляр фактически является годным: принадлежит к классу K_1 при условии, что принято решение считать его дефектным, т.е. отнести его к классу K_2 . Это - риск изготовителя;

$P(K_2 / \text{реш. } K_1)$ - условная вероятность того, что экземпляр в действительности принадлежит к классу K_2 является дефектным при условии, что принято решение считать его годным, т.е. отнести его к классу K_1 . Это - риск потребителя;

$P(\text{реш. } K_1)$ - априорная вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу K_1 , т.е. вероятность отнесения к годным любого наугад взятого экземпляра.

$P(\text{реш. } K_2)$ - априорная вероятность принятия решения об отнесении экземпляра к классу K_2 , т.е. вероятность отнесения к дефектным любого наугад взятого экземпляра. Вероятность ошибки в переименовании класса

экземпляра из K_1 в класс K_2 , т.е. вероятность того, что экземпляр является фактически годным и относительно него принято решение об отнесении к классу K_2 , равна, в соответствии с теоремой умножения вероятностей:

$$P(K_1 \text{ реш. } K_2) = P(\text{реш. } K_2 / K_1)P(K_1) = P(K_1 / \text{реш. } K_2)P(\text{реш. } K_2). \quad (15)$$

Аналогично, вероятность отнесения фактически дефектного экземпляра к годным, равна

$$P(K_2 \text{ реш. } K_1) = P(\text{реш. } K_1 / K_2)P(K_2) = P(K_2 / \text{реш. } K_1)P(\text{реш. } K_1). \quad (16)$$

Ошибочные решения всегда приводят к некоторым потерям. Обозначим потери, связанные с переименованием класса экземпляра из K_1 в K_2 , т.е. цену такого переименования, как $c_{1 \rightarrow 2}$, а цену переименования класса экземпляра из K_2 в K_1 - как $c_{2 \rightarrow 1}$. Тогда величина среднего риска (средних потерь) при многократном распознавании будет равна с учетом выражений (15) и (16)

$$\begin{aligned} \rho &= P(K_1 \text{ реш. } K_2) c_{1 \rightarrow 2} + P(K_2 \text{ реш. } K_1) c_{2 \rightarrow 1} \\ &= P(\text{реш. } K_2 / K_1)P(K_1) c_{1 \rightarrow 2} + P(\text{реш. } K_1 / K_2)P(K_2) c_{2 \rightarrow 1}. \end{aligned} \quad (17)$$

В качестве критерия оптимальности естественно взять минимум среднего риска, т.е.

$$\rho \rightarrow \min.$$

Это наиболее распространенный критерий, его называют критерием Байеса.

Минимизация среднего риска может быть достигнута путем изменения вероятностей $P(\text{реш. } K_2 / K_1)$ и $P(\text{реш. } K_1 / K_2)$. Эти вероятности могут быть определены по известным условным совместным плотностям распределения признаков (13) и (14).

Действительно,

$$P(\text{реш. } K_2 / K_1) = \int \int_{V_1} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1) dx_1 dx_2 \dots dx_k \quad (18)$$

$$P(\text{реш. } K_1 / K_2) = \int \int_{V_1} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2) dx_1 dx_2 \dots dx_k \quad (19)$$

Здесь V_1 и V_2 – области значений признаков, при которых принимается решение об отнесении экземпляра к классу K_1 и K_2 соответственно.

Подставляя (18) и (19) в (17), получим:

$$\rho = \int_{V_1} \dots \int P(K_1) \mu_{1 \rightarrow 2} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1) dx_1 dx_2 \dots dx_k + \\ + \int_{V_2} \dots \int P(K_2) \mu_{2 \rightarrow 1} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2) dx_1 dx_2 \dots dx_k.$$

Для того, чтобы избежать интегрирования многомерных плотностей, которое в большинстве случаев сопряжено со значительными математическими трудностями, приведем два многомерных интеграла к одному, используя соотношение

$$P(\text{Реш. } K_2 / K_1) = 1 - P(\text{Реш. } K_1 / K_2) = 1 - \\ - \int \dots \int_{V_1} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1) dx_1 dx_2 \dots dx_k$$

Тогда получим

$$\rho = P(K_1) \mu_{1 \rightarrow 2} - \int \dots \int_{V_1} [P(K_1) \mu_{1 \rightarrow 2} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1) - \\ - P(K_2) \mu_{2 \rightarrow 1} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2)] dx_1 dx_2 \dots dx_k.$$

$$P(\text{Реш. } K_1 / K_2) = \int \dots \int_{V_2} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2) dx_1 dx_2 \dots dx_k.$$

Всюду в области V_1 и только в ней должно выполняться

$$(P(K_1) \mu_{1 \rightarrow 2} w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1) - P(K_2) \mu_{2 \rightarrow 1} \\ \cdot w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2)) dx_1 dx_2 \dots dx_k > 0. \quad (20)$$

Значит, решение об отнесении j -го экземпляра к классу K_1 принимается тогда, когда совокупность значений его признаков $\{x^j_i\}$ удовлетворяет неравенству (20).

$$\frac{w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1)}{w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2)} > \frac{P(K_2)u_{2 \rightarrow 1}}{P(K_1)u_{1 \rightarrow 2}}$$

Обозначим отношение

$$\frac{w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_1)}{w(x_1, x_2, \dots, x_k / K_2)} = \lambda(x_1, x_2, \dots, x_k),$$

его называют отношением правдоподобия. Отношение

$$\frac{P(K_2)u_{2 \rightarrow 1}}{P(K_1)u_{1 \rightarrow 2}} = \Pi$$

определяет пороговое значение отношения правдоподобия, и оно не зависит от значений признаков $x^{(j)}$.

Обозначим $\lambda^{(j)}$ – отношение правдоподобия, найденное для j -го экземпляра:

$$\lambda^{(j)} = \frac{w(x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)} / K_1)}{w(x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)} / K_2)}$$

Тогда алгоритм оптимальной классификации формулируется кратко в следующем виде: если $\lambda^{(j)} \geq \Pi$, принимается решение об отнесении j -го экземпляра к классу K_1 ; если $\lambda^{(j)} < \Pi$, принимается решение об отнесении j -го экземпляра к классу K_2 . Если $k=1$, т.е. задача классификации решается по одному признаку, то классификацию можно проводить по пороговому значению x_{k1} самого признака, которое находится из уравнения

$$\lambda(x_{k1}) = \Pi.$$

8.3. Оценка значения прогнозируемого параметра с использованием регрессионной модели

Оценка значения прогнозируемого параметра j -го экземпляра для случая, когда принимается линейная модель зависимости между y и x , находится из выражения

$$y^{*(j)}(t_{np}) = H_x[\{x_i^{(j)}\}] = B_0 + B_1 x_1^{(j)} + \dots + B_i x_i^{(j)} + \dots + B_k x_k^{(j)}, \quad (21)$$

где $x_i^{(j)}$ — значение i -го признака j -го экземпляра;

B_i — постоянные коэффициенты;

H_x — оператор индивидуального прогнозирования по признакам с оценкой значения прогнозируемого параметра.

Для нахождения коэффициентов B_i в линейной регрессионной модели (21) удобнее перейти к центрированным и нормированным значениям \bar{x}_{ij} случайных величин x_i , которые определяются по формуле

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\bar{x}_i - M^*[\bar{x}_i]}{D^{*1/2}[\bar{x}_i]}. \quad (22)$$

Здесь $M^*[\bar{x}_i]$ и $D^{*1/2}[\bar{x}_i]$ — оценка математического ожидания и среднего квадратического отклонения случайной величины \bar{x}_i , вычисленные по данным обучающего эксперимента:

$$M^*[\bar{x}_i] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i^{(j)}; \quad (23)$$

$$D^{*1/2}[\bar{x}_i] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_i^{(j)} - M^*[\bar{x}_i])^2}. \quad (24)$$

Какова бы ни была центрированная и нормированная случайная величина \bar{y}_{ij} и k случайных величин $\bar{x}_{1ij}, \bar{x}_{2ij}, \dots, \bar{x}_{kij}$, тоже центрированных и нормированных, всегда можно найти такие коэффициенты b_i , при которых будет иметь место равенство

$$y_{ij} = b_1 \bar{x}_{1ij} + b_2 \bar{x}_{2ij} + \dots + b_k \bar{x}_{kij} + \Delta \bar{y} \quad (25)$$

независимо от законов распределения этих случайных величин

В этом выражении b_i — постоянные коэффициенты регрессионной модели с центрированными и нормированными значениями случайных величин, $\Delta \bar{y}$ — ошибка прогнозирования, которая содержит все то, что не дает линейной связи между прогнозируемым параметром $y_{ц}$ и признаком $\{x_{ил}\}$.

Коэффициенты все должны быть такими, чтобы дисперсия ошибки $D[\Delta \bar{y}]$ была минимальна, а матожидание ошибки $M[\Delta \bar{y}]$ было равно нулю, т.е.

$$D[\Delta \bar{y}] \rightarrow \min, \quad M[\Delta \bar{y}] \rightarrow 0. \quad (26)$$

Таковыми b_i являются коэффициенты, получаемые из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} r_{1л} &= b_1 r_{11} + b_2 r_{12} + \dots + b_l r_{1l} + \dots + b_k r_{1k}; \\ r_{2л} &= b_1 r_{21} + b_2 r_{22} + \dots + b_l r_{2l} + \dots + b_k r_{2k}; \\ &\dots \\ r_{iл} &= b_1 r_{i1} + b_2 r_{i2} + \dots + b_l r_{il} + \dots + b_k r_{ik}; \\ &\dots \\ r_{кл} &= b_1 r_{к1} + b_2 r_{к2} + \dots + b_l r_{кl} + \dots + b_k r_{kk}; \end{aligned}$$

где r_{il} — коэффициент корреляции между l -ым признаком и прогнозируемым параметром;

r_{il} — коэффициент корреляции между l -ым и i -м признаками,

$i, l = 1, 2, \dots, k$, причем $r_{il} = r_{li}$; $r_{ii} = 1$.

В этом случае ошибка $\Delta \bar{y}$ оказывается некоррелированной с любым из x_i . Все коэффициенты корреляции определяются с учетом выражений (22)...(24).

Решая систему k уравнений с k неизвестными (26), найдем искомые коэффициенты для выражения (25) с центрированными и нормированными случайными величинами. Для перехода от (25) к оценочному выражению (21), необходимо пересчитать значения коэффициентов b_i в новые коэффициенты B_i по формуле:

$$\bar{B}_i = b_i \frac{D^{*1/2}[\bar{y}]}{D^{*1/2}[x_i]}; \quad B_0 = M^*[\bar{y}] - \sum_{i=1}^k b_i M^*[x_i] \frac{D^{*1/2}[\bar{y}]}{D^{*1/2}[x_i]}. \quad (27)$$

В выражении (27) $M^*[\bar{y}]$ и $D^{*1/2}[\bar{y}]$ вычислены по формулам, аналогичным (23) и (24).

Если дисперсия ошибки не превышает допустимого значения, оператор прогнозирования (21) можно рекомендовать для оценки значения прогнозируемого параметра новых экземпляров. В этом случае,

измерив для m -го экземпляра значения его признаков и подставив их в выражение (25), получим оценку $y^{*(m)}(t_{np})$ в виде [323]:

$$y^{*(m)}(t_{np}) = B_0 + B_1 x_1^{(m)} + B_2 x_2^{(m)} + \dots + B_k x_k^{(m)}.$$

8.4. Классификация по одному признаку

Решение этой задачи можно осуществить по данным обучающего эксперимента, не прибегая к сложным аналитическим преобразованиям и статистическому эксперименту по определению оценки $w(x, y)$, если она неизвестна. Здесь непосредственно по данным обучающего эксперимента в ходе экзамена подбирается такое пороговое значение признака $x_{кл}$, при котором минимальна, в соответствии с выбранным критерием, требуемая вероятность ошибочных решений. Обычно в качестве такого критерия для подбора $x_{кл}$ берется минимум риска потребителя

$$P(K_2/\text{реш.}K_1).$$

Рассмотрим такой подход на примере прогнозирования стабильности резисторов. Зависимость величины сопротивления резистора от времени представляется в виде квазидетерминированной линейной модели

$$R(t) = (1 + \alpha t) R_0,$$

где R_0 – сопротивление при $t=0$; α – коэффициент старения.

Т.е. R_0 и α – случайные величины с некоторыми плотностями распределения.

В качестве признака, характеризующего стабильность резистора, можно взять напряжение шума $U_{ш}$. Прогнозируемым параметром является величина коэффициента старения α .

Пусть для обучающего эксперимента отобрано случайным образом n резисторов. У каждого резистора перед испытаниями измерены величины $U_{ш}$, R_0 . Затем резисторы ставятся на испытания в одинаковом для всех режиме на заданное время прогнозирования (например, $t_{np} = 10^4$ ч). По окончании испытаний для каждого резистора находится величина коэффициента старения:

$$\alpha = \frac{R(t) - R_0}{R_0 t_{np}}.$$

Для того, чтобы определить номер класса, к которому фактически принадлежит каждый из n экземпляров, необходимо указать граничное значение прогнозируемого параметра $\alpha_{гp}$. Оно задается исходя из допустимого отклонения величины сопротивления резистора за время t_{np} . Тогда резисторы с $\alpha < \alpha_{гp}$ будут отнесены к goodным (класс K_1) и резисторы с

$\alpha_{гр} > \alpha$ - к дефектным (класс K_2). Массив исходных для прогнозирования данных, получаемых в результате обучающего эксперимента, будет иметь вид:

Номер экземпляра	Значение признака j-го экземпляра	Фактический класс j-го экземпляра
1	$U_{ш}^{(1)}$	$K_s^{(1)}$
2	$U_{ш}^{(2)}$	$K_s^{(2)}$
⋮	⋮	⋮
j	$U_{ш}^{(j)}$	$K_s^{(j)}$
⋮	⋮	⋮
n	$U_{ш}^{(n)}$	$K_s^{(n)}$

Здесь S - номер класса, $S=1,2$.

Очевидно, что $U_{ш}$ и α - коррелированы и по данным обучающего эксперимента можно построить поле корреляции в виде, показанном на рис. 16.

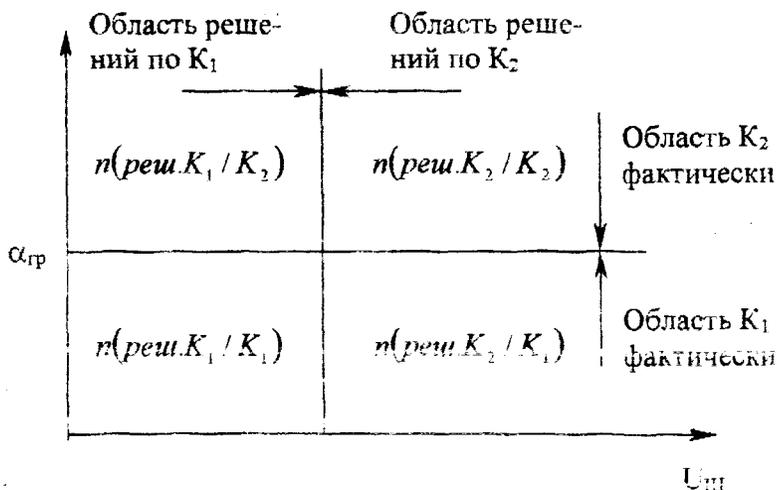


Рис. 16. Поле корреляции

Поясним теперь обозначения на рис. 16:

$n(\text{реш. } K_1 / K_1)$ - число верных решений об отнесении экземпляра, принадлежащего фактически к классу K_1 , к этому же классу, оно равно

числу экземпляров, у которых по данным обучающего эксперимента $U_{ш} \leq U_{ш\text{ кл}}$ и $\alpha \leq \alpha_{тр}$, это годные экземпляры, и по прогнозу они также будут отнесены к годным, т.е. к классу K_1 ;

$n(\text{реш. } K_2/K_2)$ – число верных решений об отнесении экземпляра, принадлежащего фактически к классу K_2 , к этому же классу, оно равно числу экземпляров, у которых $U_{ш} > U_{ш\text{ кл}}$ и $\alpha > \alpha_{тр}$, это дефектные экземпляры (класс K_2), и по прогнозу они будут отнесены к дефектным;

$n(\text{реш. } K_1/K_2)$ – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении экземпляров класса K_2 в K_1 , его обозначают также $n(K_2/\text{реш. } K_1)$, оно равно числу экземпляров, у которых $U_{ш} \leq U_{ш\text{ кл}}$ и $\alpha > \alpha_{тр}$, это фактически дефектные экземпляры (класса K_2), но по прогнозу они будут отнесены к годным (класс K_1), так как у них $U \leq U_{ш\text{ кл}}$;

$n(\text{реш. } K_2/K_1)$ – число ошибочных решений, заключающихся в отнесении экземпляров класса K_1 в K_2 , его обозначают также $n(K_1/\text{реш. } K_2)$, оно равно числу экземпляров, у которых $U_{ш} > U_{ш\text{ кл}}$ и $\alpha \leq \alpha_{тр}$, это фактически годные экземпляры (класс K_1), но по прогнозу они будут отнесены к дефектным (класс K_2), так как у них $U_{ш} > U_{ш\text{ кл}}$. Обозначим далее $n(K_1)$, $n(K_2)$ – число экземпляров, фактически принадлежащих к классу K_1 и K_2 , соответственно, при этом их сумма равна числу экземпляров, используемых в обучающем эксперименте, $n(K_1) + n(K_2) = n$;

$n(\text{реш. } K_1)$, $n(\text{реш. } K_2)$ – общее число решений, принимаемых об отнесении экземпляров соответственно к классу K_1 и K_2 по прогнозу, при этом

$$n(\text{реш. } K_1) + n(\text{реш. } K_2) = n.$$

Для введенных характеристик справедливо соотношение:

$$\begin{aligned} n(K_1) &= n(\text{реш. } K_1/K_1) + n(\text{реш. } K_2/K_1); \\ n(K_2) &= n(\text{реш. } K_1/K_2) + n(\text{реш. } K_2/K_2); \\ n(\text{реш. } K_1) &= n(\text{реш. } K_1/K_1) + n(\text{реш. } K_1/K_2); \\ n(\text{реш. } K_2) &= n(\text{реш. } K_2/K_1) + n(\text{реш. } K_2/K_2). \end{aligned}$$

Следуя принятым соотношениям, имеем:
риск потребителя –

$$P(K_2/\text{реш. } K_1) = \frac{n(K_2/\text{реш. } K_1)}{n(\text{реш. } K_1)},$$

риск изготовителя –

$$P(K_1/\text{реш. } K_2) = \frac{n(K_1/\text{реш. } K_2)}{n(\text{реш. } K_2)},$$

условные вероятности принятия ошибочных решений –

$$P(\text{реш}K_1 / K_2) = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_2)}{n(K_2)},$$

$$P(\text{реш}K_2 / K_1) = \frac{n(\text{реш}K_2 / K_1)}{n(K_1)},$$

априорные вероятности принадлежности экземпляра к классу K_1 (вероятность оказаться годным любого, наугад взятого экземпляра) –
 $P(K_1) = n(K_1)/n$

и к классу K_2 (вероятность оказаться дефектным любого, наугад взятого экземпляра) –

$$P(K_2) = n(K_2)/n.$$

Априорные вероятности принятия решений об отнесении экземпляра к классу K_1

$$P(\text{реш}K_1) = n(\text{реш}K_1)/n$$

и к классу K_2 –

$$P(\text{реш}K_2) = n(\text{реш}K_2)/n.$$

Если качество прогнозирования необходимо оценить каким-либо одним показателем, учитывающим одновременно ошибки того или другого вида, можно использовать вероятность ошибки

$$P_{\text{ош}} = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_2) + n(\text{реш}K_2 / K_1)}{n}$$

и вероятность принятия правильных решений (ее называют также эффективностью распознавания):

$$P_{\text{прав}} = 1 - P_{\text{ош}} = \frac{n(\text{реш}K_1 / K_1) + n(\text{реш}K_2 / K_2)}{n}$$

$P_{\text{ош}}$ и $P_{\text{прав}}$ уместно использовать для оценки качества прогнозирования, когда $\alpha_{1 \rightarrow 2} = \alpha_{2 \rightarrow 1}$.

Значение $U_{\text{ш.кл.}}$ должно быть выбрано таким, чтобы вероятности ошибочных решений не превышали заданного допустимого уровня.

Величина порога может быть определена путем просчета нескольких вариантов и выбором такого $U_{\text{ш.кл.}}$, при котором требования, заданные относительно величин $P_{\text{ош}}$ или $P(K_2/\text{реш}K_1)$ выполняются. Если этим требованиям не удастся удовлетворить ни при каком значении $U_{\text{ш.кл.}}$, следует попытаться использовать большее число признаков, либо найти более информативные признаки.

8.5. Оценка класса методом дискриминантных функций

Представим каждый j -й экземпляр, характеризуемый значениями признаков $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$, некоторой точкой в k -мерном пространстве признаков.

Задача индивидуального прогнозирования с классификацией на основе теории распознавания образов здесь заключается в разделении этого k -мерного пространства признаков с помощью некоторой $(k-1)$ -мерной поверхности на две области, соответствующие классам K_1 и K_2 . Эта разделяющая поверхность в общем случае задается уравнением $g(x_1, x_2, \dots, x_k) = \text{const}$. Функция $g(x_1, x_2, \dots, x_k)$ называется дискриминантной. Для распознавания класса какого-либо экземпляра достаточно по измеренным значениям его признаков определить, в какой области k -мерного пространства находится точка, координаты которой задаются этими значениями [324-326].

В общем виде постановка задачи такого прогнозирования сводится к нахождению оператора $H_{\text{ккл}}$ – оператора индивидуального прогнозирования по признакам с классификацией.

Рассмотрим случай, когда поверхностью, разделяющей пространство на две области, является гиперплоскость.

Уравнение $(k-1)$ -мерной гиперплоскости в k -мерном пространстве признаков имеет вид

$$g(x_1, x_2, \dots, x_k) = B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_k x_k = \Pi_B,$$

где $\Pi_B, B_1, B_2, \dots, B_k$ – постоянные коэффициенты, задающие положение гиперплоскости в k -мерном пространстве.

Тогда имеем дискриминантную функцию $g(x_1, x_2, \dots, x_k) = B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_k x_k$. Размерность коэффициентов B_i обратна размерности соответствующих признаков x_i .

Необходимо отыскать такие значения коэффициентов B_i и Π_B , которые наилучшим образом (в смысле минимума ошибочных классификаций) задавали бы положение этой гиперплоскости в пространстве признаков.

Поскольку объем выборки, используемой в обучающем эксперименте, ограничен, то по его результатам определяются не истинные значения коэффициентов B_i , а только их оценки β_i .

Рассмотрим в общем виде метод нахождения оценок β_i . По данным обучающего эксперимента известен фактический класс, к которому принадлежит каждый из n экземпляров, – $K_i^{(j)}$. Если выбрать все экземпляры, попавшие в класс K_1 и соответственно в класс K_2 , можно найти оценки условных математического ожидания и дисперсии каждого i -го признака x_i при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1 :

$$M^*[\bar{x}_i / K_1] = 1/n_1 \sum_{\substack{j=1 \\ j \in K_1}}^n x_i^{(j)},$$

$$D^*[\bar{x}_i / K_1] = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \in K_1}}^n \{x_i^{(j)} - M^*[\bar{x}_i / K_1]\}^2$$

и к классу K_2 :

$$M^*[\bar{x}_i / K_2] = 1/n_2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \in K_2}}^n x_i^{(j)},$$

$$D^*[\bar{x}_i / K_2] = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{\substack{j=1 \\ j \in K_2}}^n \{x_i^{(j)} - M^*[\bar{x}_i / K_2]\}^2$$

Здесь n_1, n_2 - число экземпляров класса K_1 и K_2 соответственно, $n_1 + n_2 = n$.

Используя теоремы о числовых характеристиках случайных величин, определим оценки условных матожиданий случайной величины:

$$G = g(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k) \quad (28)$$

при условии, что экземпляр принадлежит к классу K_1 :

$$M[G / K_1] = \sum_{i=1}^k \beta_i M^*[\bar{x}_i / K_1] \quad (29)$$

и к классу K_2 :

$$M[G / K_2] = \sum_{i=1}^k \beta_i M^*[\bar{x}_i / K_2]. \quad (30)$$

а также соответствующие оценки условных дисперсий, полагая для простоты, что признаки между собой некоррелированы:

$$D^*[G / K_1] = \sum_{i=1}^k \beta_i^2 D^*[\bar{x}_i / K_1]. \quad (31)$$

$$D^*[G / K_2] = \sum_{i=1}^k \beta_i^2 D^*[\bar{x}_i / K_2]. \quad (32)$$

Критерием оптимизации при нахождении оценок коэффициентов β_i может быть выражение вида

$$\frac{M^*[G/K_1] - M^*[G/K_2]}{\sqrt{D^*[G/K_1] + D^*[G/K_2]}} \rightarrow \text{extr.} \quad (33)$$

Подставив в это выражение оценки условных матожиданий и дисперсий случайной величины G (28), определяемые выражениями (29)÷(32), получим

$$V(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) = \frac{\left| \sum_{i=1}^k \beta_i M^*[x_i/K_1] - \sum_{i=1}^k \beta_i M^*[x_i/K_2] \right|}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \beta_i^2 D^*[x_i/K_1] + \sum_{i=1}^k \beta_i^2 D^*[x_i/K_2]}} \quad (34)$$

Взяв частные производные $\frac{\partial V}{\partial \beta_i}$ и приравняв их к нулю, получим

систему k алгебраических уравнений с k неизвестными $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ для нахождения оптимальных оценок $\beta_{\text{опт}}$. Полученные $\beta_{\text{опт}}$ будут определять наилучший «наклон» гиперплоскости в пространстве признаков.

Теперь необходимо найти пороговое значение Π_g для дискриминантной функции $g(x_1, x_2, \dots, x_k)$, которое задает наилучшее положение разделяющей гиперплоскости. Очевидно, должно выполняться $M^*[G/K_1] > \Pi_g > M^*[G/K_2]$ или $M^*[G/K_1] < \Pi_g < M^*[G/K_2]$.

При изменении порога будут изменяться вероятности ошибочных решений. Величину порога можно найти путем нескольких просчетов вероятности ошибочных решений по данным обучающего эксперимента для различных Π_g и выбором такого из них, при котором оказалась наименьшей вероятность ошибочных решений.

Если полученная вероятность не превышает допустимого значения, найденный оператор можно использовать для прогнозирования класса новых экземпляров (не участвовавших в обучающем эксперименте). Для этого измеряются значения признаков $x_i^{(m)}$ нового m -го экземпляра и вычисляется дискриминантная функция

$$G^{(m)} = g(x_1^{(m)}, x_2^{(m)}, \dots, x_k^{(m)}) = \sum_{i=1}^k x_i^{(m)} \beta_i$$

Если имеет место неравенство $M^*[G/K_1] > M^*[G/K_2]$ и при этом $G^{(m)} \geq \Pi_g$, то принимается решение об отнесении m -го экземпляра к классу K_1 , если $G^{(m)} < \Pi_g$, принимается решение об отнесении его к классу K_2 .

8.6. Оценка класса методом потенциальных функций

Постановка задачи прогнозирования сводится также, как и в методе дискриминантных функций, к нахождению оператора прогнозирования.

Сущность индивидуального прогнозирования методом потенциальных функций состоит в таком нелинейном преобразовании пространства признаков, которое усиливает, подчеркивает разделение классов. Кроме того, в самой процедуре обработки результатов обучающего эксперимента предлагается оперировать не со значениями признаков, а с их разностью. Но, так как каждый признак имеет свою физическую природу, а значит и размерность, применяют нормирование признаков для того, чтобы получить безразмерные величины. При этом желательно такое нормирование, которое бы содействовало лучшей разделимости классов.

Предлагается осуществить нормирование следующим образом:

$$x_{in}^{(j)} = x_i^{(j)} / D^{*1/2} [\bar{x}_i],$$

где $x_{in}^{(j)}$ – нормированное значение i -го признака j -го экземпляра;

$x_i^{(j)}$ – измеренное значение i -го признака j -го экземпляра;

$D^{*1/2} [\bar{x}_i]$ – оценка дисперсии i -го признака по всем n экземплярам (смотри формулу (24)).

Для простоты записи далее будем обозначать $x_{in}^{(j)}$ как $x_i^{(j)}$.

Переходя от значений признаков к их разностям, находят $R_i^{(j)}$ – единичное расстояние между значениями i -го признака для j -го и l -го экземпляров:

$$R_i^{(j)} = | x_i^{(j)} - x_i^{(l)} |.$$

Обобщенное расстояние по всем k признакам для j -го и l -го экземпляров определяют выражением:

$$R^{(j,l)} = \sqrt{\sum_{i=1}^k [x_i^{(j)} - x_i^{(l)}]^2}.$$

Введем понятие потенциала j -го экземпляра, наводимого на него l -м экземпляром:

$$\phi^{(j)} = Q_1 / 1 - \alpha [R^{(j,l)}]^\beta,$$

где α и β – коэффициенты, определяемые экспериментально (часто берут $\alpha=4$ и $\beta=3$);

$Q_1 = \pm 1$ – коэффициент, учитывающий класс (K_1 и K_2), к которому принадлежит l -й экземпляр.

Условимся, если потенциал наводится от экземпляра, принадлежащего к классу K_1 , то $Q_1=1$, в противном случае $Q_1=-1$.

Однако величина потенциала $|\varphi^{(j)}|$ дает представление о взаимном расположении только двух векторов признаков (j -го и l -го экземпляров) в нелинейно преобразованном пространстве. Поэтому переходят к обобщенному суммарному потенциалу каждого экземпляра, для чего используют весь массив исходных данных обучающего эксперимента.

Пусть по результатам обучающего эксперимента оказалось, что число экземпляров, принадлежащих к классу K_1 , равно n_1 , а число экземпляров класса K_2 — n_2 ; $n_1 + n_2 = n$. Тогда, располагая значениями всех $\varphi^{(jl)}$ ($j, l = 1, 2, \dots, n$; $j \neq l$), можно вычислить суммарный потенциал каждого экземпляра, используемого в обучающем эксперименте.

Условимся далее обозначать $j \in K_1$ или $j \in K_2$, если j -й экземпляр принадлежит соответственно классу K_1 или K_2 . Обозначим $\varphi_{j \in K_1, \Sigma}$ — суммарный потенциал, наводимый на j -й экземпляр класса K_1 всеми остальными $(n-1)$ экземплярами, используемыми в обучающем эксперименте, и $\varphi_{j \in K_2, \Sigma}$ — суммарный потенциал, наводимый на j -й экземпляр класса K_2 всеми остальными $(n-1)$ экземплярами.

Тогда для любого j -го экземпляра, принадлежащего к классу K_1 , этот суммарный потенциал находится по формуле

$$\varphi_{j \in K_1, \Sigma} = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{l \in K_1, l \neq j} \varphi^{(jl)} + \frac{1}{n_2} \sum_{l \in K_2} \varphi^{(jl)}$$

Пусть $\Pi_p = 0$. Тогда, если $\varphi_{j \in K_1, \Sigma} \geq 0$, то j -й экземпляр относим к классу K_1 ; если $\varphi_{j \in K_1, \Sigma} < 0$, то j -й экземпляр относим к классу K_2 . Число ошибочных решений обозначим $n(K_1/\text{реш. } K_2)$.

Аналогично для каждого j -го экземпляра класса K_2 найдем суммарный потенциал:

$$\varphi_{j \in K_2, \Sigma} = \frac{1}{n_1} \sum_{l \in K_1} \varphi^{(jl)} + \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{l \in K_2, l \neq j} \varphi^{(jl)}$$

Если $\varphi_{j \in K_2, \Sigma} < 0$, то j -й экземпляр принадлежит к классу K_1 ; если $\varphi_{j \in K_2, \Sigma} \geq 0$ — принимаем решение об отнесении j -го экземпляра к классу K_2 . Число ошибочных решений обозначим $n(K_2/\text{реш. } K_1)$.

Если оценки вероятностей ошибочных решений согласуются с установленными требованиями, считаем, что экзамен прошел успешно и полученным оператором можно пользоваться для прогнозирования класса изделий этого вида. Для этого необходимо определить суммарный потенциал каждого m -го экземпляра, вновь предъявленного к прогнозированию, по выражению

$$\varphi_{m,\Sigma} = \frac{1}{n_1} \sum_{i \in K_1} \varphi^{(mj)} + \frac{1}{n_2} \sum_{i \in K_2} \varphi^{(mj)}$$

Если прогнозируемый m -й экземпляр принадлежит к классу K_1 , то первая сумма будет велика, а вторая мала, и наоборот.

8.7. Метод генерации прогнозных альтернатив

Предположим, что объект прогноза характеризуется некоторым конечным множеством параметров $X_m(X_1, X_2, \dots, X_k, \dots, X_m)$, каждый из которых может приобрести в течение всего периода упреждения ряд дискретных действительных значений. Весь период упреждения разбит на K интервалов и для каждого из параметров известен ряд альтернативных решений $A_i(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij})$. Если для каждого значения a_j параметра из множества X существуют оценки (по какой-либо шкале) квазиуниверсальных показателей (осуществимости, желательности и применимости), представленные каждым из экспертов для каждого из K интервалов, то, определив для каждого значения параметра усредненные величины оценок этих показателей с учетом компетентности экспертов, получим m подмножество оценок. Последние характеризуют осуществимость (желательность, применимость) каждого параметра в течение всего периода упреждения [327].

Если определить для каждого значения параметра из множества параметров объекта X_m величину разностей показателей «желательность - осуществимость», то можно получить два подмножества коэффициентов, которые, исходя из их интерпретации, можно представить как коэффициенты веса данного значения параметра, с точки зрения разработчиков и потребителей:

$$q_{ijk}^p = J_{ijk} - O_{ijk} \quad \text{— (коэффициент веса, с точки зрения разработчика);}$$

$$q_{ijk}^n = J_{ijk} - \Pi_{ijk} \quad \text{— (коэффициент веса, с точки зрения потребителя),}$$

где $J_{ijk}(\Pi_{ijk}, O_{ijk})$ — оценка желательности (применимости, осуществимости) j -го значения i -го параметра из множества X_m в k -й момент времени.

Просуммировав величины коэффициентов веса всех значений i -го параметра объекта и разделив величину коэффициента веса каждого значения параметра в данный момент времени на эту сумму, получим коэффициенты относительной важности производства устройства, имеющего эти значения параметров:

$$G_{ijk}^p = \frac{q_{ijk}^p}{\sum_{Q=1}^C q_{ijk}^p} \quad \text{— (коэффициент относительной важности, с точки зрения разработчика);}$$

$$G_{ijk}^{\Pi} = \frac{q_{ijk}^{\Pi}}{\sum_{j=1}^C q_{ijk}^{\Pi}} \quad (\text{коэффициент относительной важности, с точки зрения потребителя}).$$

Распределение ресурсов, выделенных на разработку $R_{НИОКР}^{MAX}$ и на производство $R_{ПРОИЗВ}^{MAX}$, может осуществляться в соответствии со следующими формулами:

$$R_{ijk}^{НИОКР} = R_{НИОКР}^{MAX} G_{ijk}^P;$$

$$R_{ijk}^{ПРОИЗВ} = R_{ПРОИЗВ}^{MAX} G_{ijk}^{\Pi}.$$

где $R_{ijk}^{НИОКР}$ и $R_{ijk}^{ПРОИЗВ}$ - количество ресурсов, выделяемых для развития направления разработок или производства, соответствующего параметру a_{ij} в момент времени k .

Таким образом, если для каждого значения параметра объекта прогноза в каждый период времени определить значение относительных коэффициентов важности, то можно получить два множества этих коэффициентов, оцениваемые как модели распределения ресурсов между различными направлениями разработок и производства, соответствующим параметрам объекта прогноза. Эти подмножества являются основой для построения моделей распределения ресурсов между различными направлениями разработок и производства, соответствующими параметрами объекта прогноза.

8.8 Прогнозирование долговечности методом нестационарных временных рядов

Известно, что испытания на долговечность являются, как правило, продолжением испытаний на безотказность (ГОСТ В20.57 404-81). В этом случае предлагается воспользоваться результатами испытаний на безотказность, представив их в виде временных рядов процесса деградации изделий, а испытания на долговечность заменить имитацией [328].

Для построения нестационарных временных рядов процесса деградации характеристик ИС может быть использован метод Бокса-Дженкинса. Метод основан на том, что гладкий нестационарный временной ряд путем взятия разностей некоторого n -го порядка можно

свести к эквивалентному стационарному, т.е. к случаю, для которого разработаны методы анализа и прогнозирования. В методе Бокса-Дженкинса нестационарный временной ряд представляется в виде модели:

$$\varphi(B)\nabla^p Z = \theta(B)a_t$$

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p,$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q,$$

где $\varphi(B)$ – оператор авторегрессии; ∇ – оператор разности ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$);

p – порядок разности, обеспечивающий переход от нестационарного ряда к эквивалентному стационарному; q – порядок и $\theta(B)$ – оператор проинтегрированного скользящего среднего, соответственно; a_t – последовательность независимых случайных величин, имеющих одинаковое нормальное распределение с параметрами $M(a_t) = 0$ и дисперсией $\sigma(a_t)$ (белый шум); p – порядок авторегрессии.

8.9. Отбраковка методом индивидуальной функции состояния

Для выявления потенциально ненадежных изделий методом индивидуальной функции состояния измеряют информативные параметры данных изделий. Указанную совокупность параметров $\{\xi_s\}$, $S = 1, 2, \dots, n$, нормируют с помощью выражения:

$$\hat{\xi}_s = (\xi_s^* - \xi_{\text{opt}}^*) / (\xi_s^* - \xi_s^-),$$

(35)

где $\hat{\xi}_s$ – относительное значение параметра ξ_s ; ξ_s^* – граничное значение ξ_s , определяемое паспортными данными; ξ_{opt} – оптимальное значение ξ_s . Так как $\hat{\xi}_s$ имеет два значения, то верхняя граница берется при $\xi_s > \xi_{\text{opt}}$, а нижняя при $\xi_s < \xi_{\text{opt}}$. В результате нормирования (35) получается совокупность случайных чисел:

$$\{\hat{\xi}_s\}, S = 1, 2, \dots, n.$$

Данная совокупность описывается функцией распределения $\Phi(\hat{\xi}_s)$, которая называется индивидуальной функцией состояния.

В случае измерения параметров изделий $n > 20$ $\Phi(\hat{\xi}_s)$ строится методом распределения для малых выборок. Совокупность $\{\hat{\xi}_s\}$ располагается в порядке возрастания $\hat{\xi}_s$ и каждому члену ряда

приписывается вероятность $1/n$. В результате получается дискретное распределение вероятности, называемое распределением выборки.

Функция распределения выборки:

$$\Phi(\hat{\xi}) = v/n,$$

где v - число членов выборки $\hat{\xi}$, попавших в текущий интервал длиной h .

Разбивая ось $0 \hat{\xi}$ на интервалы длиной h и построив на каждом из них прямоугольник высотой $\frac{\mu}{hm}$ (μ -число значений $\hat{\xi}$, попавших в данный интервал), получим гистограмму выборки или гистограмму индивидуальной функции состояния. Для идеального изделия гистограмма имеет вид, показанный на рисунке 17. Возможный вариант реального изделия показан на рисунке 18.

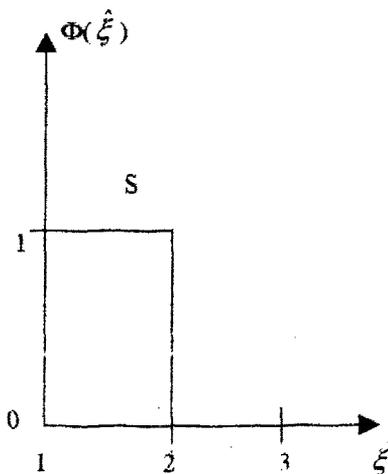


Рис. 17.

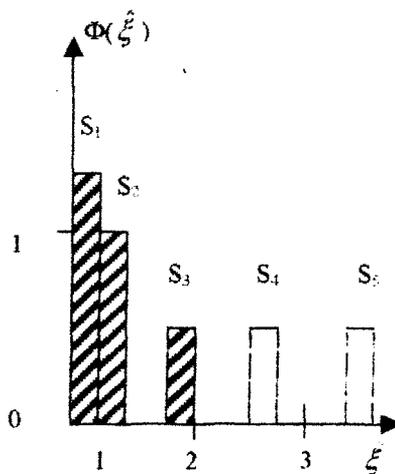


Рис. 18.

Площадь S , ограниченная прямоугольником (рис.17), равна сумме площадей прямоугольников S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 (рис.18). По отношению суммы площадей заштрихованных прямоугольников (рис.18) к сумме площадей незаштрихованных прямоугольников можно судить, в общем случае, о надежности и качестве реального изделия. В общем случае критерий качества:

$$\Lambda = \frac{\int_1^2 \Phi(\hat{\xi}) d\hat{\xi}}{\int_2^{\infty} \Phi(\hat{\xi}) d\hat{\xi}}$$

По способу построения гистограммы очевидно, что:

$$\Lambda = \frac{V_1}{V_2},$$

где v_1 – число параметров $\hat{\xi}$, попавших в интервал [1,2];

v_2 – число параметров, имеющих значение $\hat{\xi} > 2$.

Задаваясь значениями критерия качества Λ для различных классов надежности изделия, возможно их разделение на заданное количество классов надежности. Наиболее просто разбить все изделия на три класса: ненадежные, надежные приборы и изделия повышенной надежности [329].

Матожидание $\bar{\Lambda}$ для совокупности изделий одной партии соответствует значению класса надежности данной партии, граничные значения Λ соответствуют изделиям пониженной ($\Lambda_{гр\ мин}$) и повышенной надежности, т.е. находится в области значений, близких к $\Lambda_{гр\ макс}$.

8.10. Метод машинных испытаний

Рассмотрим этот метод на примере прогнозирования надежности лазеров. На первом этапе исследований путем измерений через равные интервалы времени t значений мощности излучения Z каждого лазера накапливалась информация о кинетике деградиационного процесса. Длительность испытаний составляла $k=40 \div 50$ условных единиц наработки. Полученные данные представлялись в виде экспериментальных временных рядов $\{Z_i\} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_k\}$ дрейфа логарифма мощности излучения. Логарифмирование исходного временного ряда проводилось для уменьшения порядка дифференцирования (разности) при переходе к эквивалентному стационарному процессу, поскольку исходный нестационарный ряд имел экспоненциальный тремб. На этом же этапе путем дублированных измерений изучалась погрешность измерений $\{\epsilon_i\}$ процесса деградации $\{Z_i\}$. Было установлено, что $\{\epsilon_i\}$ стационарна, некоррелирована, имеет нормальное распределение, а ее среднеквадратическое отклонение составляет 0,2 % от логарифма мощности излучения [330].

На втором этапе при моделировании экспериментальных временных рядов $\{Z_t\} = \{Z_t + \varepsilon_t\}$ и данных о погрешности измерений $\{\varepsilon_t\}$ для каждого образца строилась модель собственного процесса деградации $\{Z_t\}$.

С целью преобразования исходных нестационарных временных рядов строились и анализировались разностные временные ряды с порядком разности $p \leq 3$. Было установлено, что для изучаемых процессов стационарной являлась разность первого порядка $\{\nabla Z_t\} = \{Z_t - Z_{t-1}\}$, т.е. скорость деградационного процесса. При этом сам процесс деградации $\{Z_t\}$ каждого образца описывался моделью типа авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего

$$\nabla Z_t = \mu + a_t - \theta_1 a_{t-1},$$

где μ - средний уровень скорости процесса деградации, дисперсия которой $\sigma^2 = \sigma_a^2(1 + \theta^2)$; $\{a_t\}$ - нормальный некоррелированный белый шум с постоянной дисперсией σ_a^2 , который является случайным аргументом модели и определяет характер вероятностной зависимости скорости деградации $\{\nabla Z_t\}$ от времени t ; θ - коэффициент скользящего среднего, отражающий характер корреляционной связи текущих значений скорости ∇Z_t от ее предшествующих значений ∇Z_{t-1} .

Детерминированная составляющая процесса деградации Z_t характеризуется параметром μ , а его вероятностная составляющая - параметрами θ и σ_a^2 .

На третьем этапе на основе машинных испытаний моделей деградации изделий прогнозировалась надежность каждого лазера. Для этого, «разыгрывая» методом Монте-Карло неизвестные значения импульсов белого шума для моментов $t \in [k, \Pi]$ с помощью вероятностной модели деградации, строили совокупность статистически возможных продолжений процесса деградации каждого изделия. Рассматривая эту совокупность по отношению к границе $Z_{\text{г}}$ рабочей области, регистрировали выборку возможных наработок до отказа изделия. Далее по ней вычисляли функции распределения вероятностей наработки до отказа $P_{\text{гов}}(t_{\text{отк}} \leq t)$ изделия, а также рассчитывали вероятностные показатели его индивидуальной надежности, например, вероятность $q(t) = P_{\text{гов}}(t_{\text{отк}} \leq t)$ и плотность вероятности $w(t) = dq/dt$ отказа изделия.

8.11. Индивидуальное прогнозирование методами экстраполяции

Для анализа постепенных отказов целесообразно использовать прогнозирование, которое основано на квазидетерминированных моделях, описывающих монотонную составляющую случайного процесса $\bar{y}_{\text{гов}}(t)$. Для любого j -го экземпляра моделью $y_{\text{гов}}^j(t)$ может служить наилучшим

образом подобранная функция времени $f_{\text{кр}}(t, a^{(j)}_0, a^{(j)}_1, a^{(j)}_2)$, зависящая, кроме того от нескольких (обычно не более трех) дополнительных аргументов $a^{(j)}_0, a^{(j)}_1, a^{(j)}_2$, т.е. полагается, что

$$y^{(j)}_{\text{моя}}(t) = f_{\text{кр}}(t, a^{(j)}_0, a^{(j)}_1, a^{(j)}_2).$$

При этом считается, что $a^{(j)}_0, a^{(j)}_1, a^{(j)}_2$ есть реализация случайных величин $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2$ и тогда моделью случайного процесса $\bar{y}(t)$ является

$$\bar{y}(t) \approx f_{\text{кр}}(t, \bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2) = \bar{y}^*(t),$$

где $\bar{y}^*(t)$ – краткое обозначение модели случайного процесса $\bar{y}(t)$.

Таким образом, использование квазидетермированных моделей в индивидуальном прогнозировании основано на замене реального случайного процесса $\bar{y}(t)$ более простым процессом $\bar{y}^*(t)$ т.е. на предположении, что можно считать [331]:

$$\bar{y}(t) \approx \bar{y}^*(t) = f_{\text{кр}}(t, a_0, a_1, a_2).$$

Это допустимо, когда флуктуационная составляющая случайного процесса $y_{\text{фл}}(t)$ несущественна

Наибольшее распространение получили линейные, экспоненциальные, логарифмические и параболические модели.

Функцию $f_{\text{кр}}$ обычно подбирают так, чтобы

$$f_{\text{кр}}(t_0, a_0, a_1, a_2) = a_0.$$

Тогда значение коэффициента a_0 находится очень просто, оно равно значению случайного процесса $y(t)$ в начальный момент t_0

$$a_0 = y(t_0).$$

Для выбора подходящей $f_{\text{кр}}$ необходим специальный, так называемый обучающий эксперимент, заключающийся в наблюдении за экземплярами и регистрации значений прогнозируемого параметра каждого из них в моменты $t_1, t_2, \dots, t_k, t_{\text{пр}}$.

Математические ожидания случайных процессов в этом случае вычисляются по формуле

$$m_y(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y^{(j)}(t),$$

где $y^{(j)}(t)$ – значение стабильности j -го экземпляра, измеренные в момент времени t .

После получения значений $m_y(t)$ необходимо будет построить графические зависимости изменения прогнозируемых параметров от времени. Затем по характеру изменения $m_y(t)$ необходимо будет подобрать тот или иной вид $f_{\text{кр}}$. Предварительные исследования показали, что для ЭРИ может быть использована логарифмическая модель вида

$$f_{\text{кр}}(t, a^{(j)}_0, a^{(j)}_1) = a^{(j)}_0 \ln(a^{(j)}_1 (T_{\text{пр}} - T_1) + e).$$

Модель подбирается таким образом, чтобы в начальный момент времени $t_0=t_1$

$$f_{\text{кл}}(t_1, a^{(i)}_0, a^{(i)}_1) = a^{(i)}_0.$$

Таким образом, для классификации необходимо будет определить лишь коэффициент a_1 .

Индивидуальность прогнозирования, как уже отмечалось, заключается в том, что для одного и того же вида $f_{\text{кл}}$ значения a_0 и a_1 определяются в зависимости от конкретного хода j -ой реализации, т.е. поведения прогнозируемого параметра j -го экземпляра.

Следующий этап исследований будет состоять в нахождении коэффициентов $a^{(i)}_1$ таких, при которых функция $f_{\text{кл}}(t, a^{(i)}_0, a^{(i)}_1)$ (где $i=1, 2, \dots, K$) возможно меньше отклонялась бы от измеренных значений прогнозируемого параметра $y^{(i)}(t)$.

Для этого можно использовать метод наименьших квадратов. Сущность этого метода заключается в нахождении таких $a^{(i)}_1$, чтобы сумма квадратов разности измеренных и вычисленных по $f_{\text{кл}}$ значений прогнозируемого параметра была минимальной, т.е.

$$\sum_{i=1}^n [y^{(i)}(t) - f_{\text{кл}}(t, a_0^{(i)}, a_1^{(i)})]^2 \rightarrow \min.$$

где $i=1, 2, \dots, n$ — количество измерений.

Так как $a^{(i)}_0 = y^{(i)}(t_0)$, а для логарифмических моделей $a^{(i)}_0 = y^{(i)}(t_1)$, поэтому сумма представляет собой функцию одной переменной; обозначим ее как $g(a_1^{(i)})$ тогда

$$g(a_1^{(i)}) = \sum_{i=1}^n [y^{(i)}(t) - f_{\text{кл}}(t, y^{(i)}(t_0), a_1^{(i)})]^2.$$

Минимум этой функции достигается при таких $a_1^{(i)}$, при которых ее частная производная обращается в нуль, т.е.

$$\frac{\partial g(a_1^{(i)})}{\partial a_1^{(i)}} = 0.$$

Для логарифмической модели

$$\frac{\partial g(a_1^{(i)})}{\partial a_1^{(i)}} = 2 \left(\sum_{i=1}^n \frac{a_1^{(i)} (t-t_1) \ln(a_1^{(i)} (t-t_1) + e)}{a_1^{(i)} (t-t_1) + e} - \sum_{i=1}^n \frac{a_1^{(i)} (t-t_1)}{a_1^{(i)} (t-t_1) + e} \right) = 0$$

9. МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

9.1. Управление качеством

Качество продукции (в дальнейшем изделия) – это совокупность свойств изделия, обуславливающая возможность его применения и удовлетворяющая определенным требованиям потребителя. Инженерный подход к определению качества изделия связан с рассмотрением технических закономерностей в проявлении различных свойств изделия одного и того же функционального назначения. С этих позиций качество исследуется с точки зрения сопоставления совокупности свойств данного изделия с аналогичным изделием, которое принято за эталон сравнения. Экономический подход предусматривает оценку степени соответствия свойств изделия, удовлетворяющих определенные потребности в фиксированных (заданных) условиях его использования. В соответствии со стандартом ИСО – 8402 эта совокупность свойств и характеристик изделия должна удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности.

Качество изделий определяется рядом факторов. Уровень качества закладывается на ранних стадиях разработки. Одно из главных мест здесь занимает тот научно – технический задел, которым располагает разработчик продукции и которым он может воспользоваться при анализе и выборе стратегий проектирования, технических идей, альтернативных вариантов решений.

Практическая деятельность инженера базируется на накопленных им и человечеством знаниях. Эти знания человечество не только накапливает, но и уточняет и передает из поколения в поколение. Тем самым обеспечивается прогресс в производстве продукции. Качество изделий зависит от того, какие научные идеи получают свое материальное воплощение в технической документации.

По мнению академика Субетто А.И. [332] качество – «ядро» национальной идеи России на стратегическом горизонте ее будущего. Качество рассматривается им как геополитическая стратегия возрождения и развития экономики и цивилизации страны. В конце XX века отмечается формирование «философии качества» как новых областей обществоведения, философской и экономической наук. Анализ цивилизационных процессов в развитии человечества показывает, что в настоящее время происходит синтетическая революция как «система революций» в основаниях бытия и механизмах цивилизационного развития. Ее структура приведена на рис.19.

Синтетическая цивилизационная революция меняет содержание основных механизмов развития общества, придавая им более системно – синтетический характер. Для понимания категории качества как

цивилизационной категории [332] введено понятие «социального кругооборота качества». Схема социального оборота качества



Рис. 19. Структура синтетической цивилизационной революции

представлена на рис 20

Социальный кругооборот качества складывается из двух основных оборотов. «кругооборота качества» в системе воспроизводства общественного производства и соответственно материальных условий жизни и «кругооборота качества» в системе воспроизводства человека, его интеллекта и общественного интеллекта. Идет становление квали – экономики и квали – общества. Завершение их становления связывается с образованием (становлением) нового типа цивилизации человечества

– цивилизации, реализующей социоприродную революцию на базе общественного интеллекта и образовательного общества. В этой цивилизации впервые произойдет переход к управлению качеством жизни, но не в социальном, а в «социоприродном пространстве жизни».

Управлению качеством на данном этапе во всех развитых странах мира уделяется очень большое внимание. Сформировалась определенная стратегия в управлении качеством. Она характеризуется следующим рядом моментов: обеспечение качества понимается не как техническая функция, которая может реализоваться каким – то одним подразделением, а как систематический процесс, пронизывающий всю организационную структуру фирмы; новому понятию качества должна отвечать соответствующая организационная структура предприятия; вопросы качества актуальны не только в рамках производственного цикла, но и в процессе разработки, конструирования, маркетинга, обслуживания; качество должно быть ориентировано на удовлетворение требований потребителя, а не изготовителя; повышение качества продукции требует применения новой технологии производства, автоматизации, начиная с проектирования и заканчивая автоматизированным измерением в процессе контроля качества; всеобъемлющее повышение качества достигается только заинтересованным участием всех работников.

В условиях острой конкурентной борьбы фирмы могут успешно развиваться лишь внедряя системное управление качеством продукции. Таким образом, управление качеством происходит через систему управления качеством. О наличии системы управления качеством можно говорить только в том случае, если все показатели качества изделия, все факторы качества процесса систематизированы и осуществляется системный подход к установлению, обеспечению, поддержанию и повышению качества продукции. Управление качеством как совокупность действий при создании и эксплуатации изделия, осуществляется через контур управления. Модель управления качеством целесообразно представить в виде структурной схемы (рис. 21).

Система управления качеством – это совокупность управляющих органов и объектов управления, взаимодействующих с помощью материально – технических и информационных средств при управлении качеством продукции (рис. 22).

В соответствии с ИСО серии 9004 в жизненный цикл продукции («петля качества») входят следующие этапы: 1) маркетинг, поиск и изучение рынка; 2) проектирование и (или) разработка технических требований; 3) разработка продукции; 4) материально – техническое снабжение; 5) подготовка и разработка производственных процессов; 6) производство продукции; 7) контроль, проведение испытаний и обследование; 8) упаковка и хранение; 9) реализация и распределение;

10) техническая помощь и обслуживание; 11) утилизация после использования (рис.23).

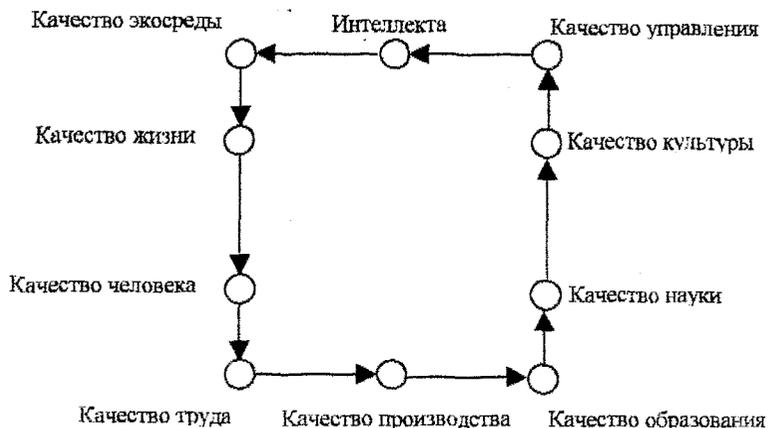


Рис.20. Социальный оборот качества

9.2. Системы управления

9.2.1. Структурные схемы систем управления технологическими процессами

Важнейшим звеном системы управления качеством изделий является система управления технологическими процессами. Ее обычно рассматривают как подсистему, входящую в состав общей системы управления качеством. Управление ТП должно отвечать условиям оптимальности. Оптимальное управление процессами формообразования и структурообразования, монтажа и сборки, герметизации, контроля и испытаний предполагает решение двухэтапной задачи: задачи внешней оптимизации назначения технологических условий и режимов формирования изделий, обеспечивающих требуемые функциональные характеристики и параметры качества, и задачи внутренней оптимизации – адаптивного управления процессами нанесения, обработки, стабилизации свойств

изделий, позволяющего компенсировать нестабильность процессов, вызванную износом

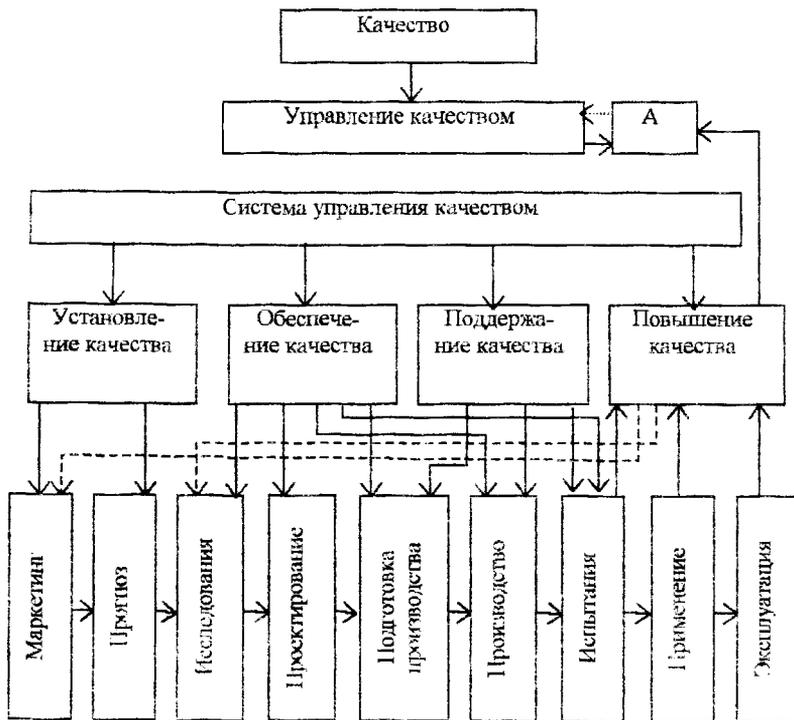


Рис.21. Модель управления качеством

технологической оснастки и оборудования, деградацией контролируемых элементов, другими факторами. При этом важно правильно разработать или выбрать модель технологической обработки, определить тип технологического оборудования, провести подготовку исполнителей.

На рис.24 представлена структурная схема управления простым технологическим процессом. В данном случае управление осуществляется с помощью обратной связи только по входу технологического процесса на основании результатов контроля готовых изделий. А исполнитель (рабочий, оператор, мастер, и т.д.) осуществляет при наличии автоматической обратной связи только наблюдение за входом. Приведенная схема технологического процесса справедлива только для простого и отработанного процесса, когда известна связь между его

входными и выходными параметрами. Только в этом случае управление может проводиться по входу[333]. Такое управление может быть применено для операционного ТП.

Для управления сложными технологическими процессами используется схема, которая позволяет наблюдать за «входом», «процессом» и «выходом», запоминать различные сочетания их

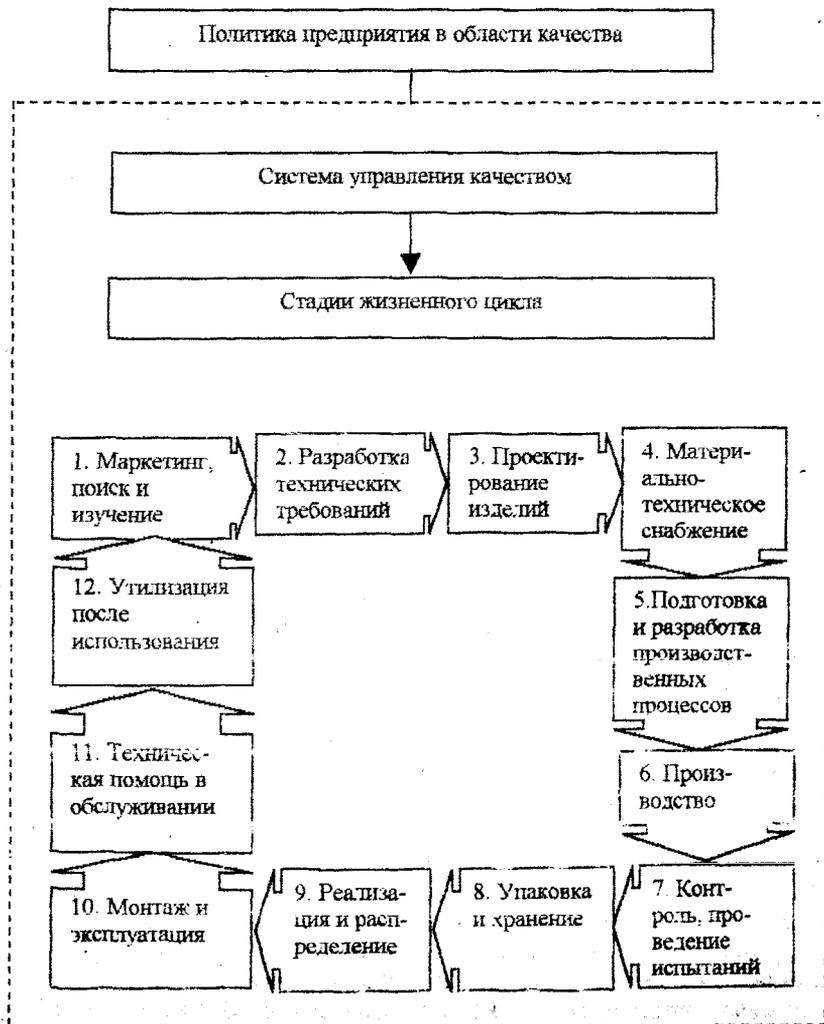


Рис. 22. Система качества промышленного предприятия

отклонений и по накопленным данным устанавливать меру влияния «входа» и «процесса» на результат. В данном случае «выход» данной

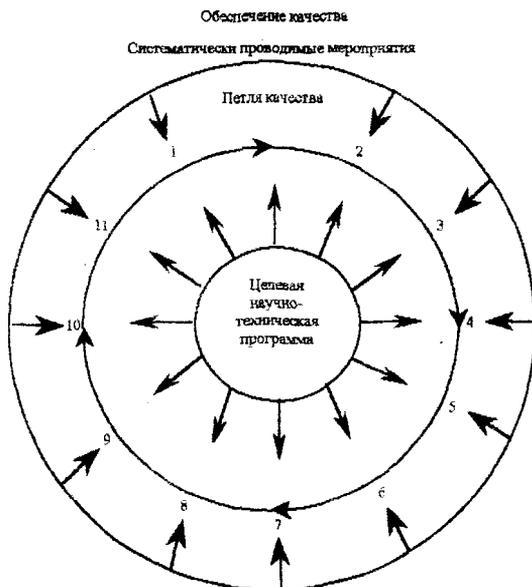


Рис.23. Петля качества

подсистема фактически является выходом всей системы управления качеством. На рис.25 приведена схема управления сложными технологическими процессами. Она предусматривает функционирование параметров X, Y и Z по информации, полученной от каждой операции. По полученным данным подсистема на своем выходе выдает «проект решения», представляющий собой предложение о том, что и где нужно изменить. На основании этой информации исполнитель принимает решение и производит соответствующие корректировки «входа», «процесса» и «выхода».

Данная подсистема является основным звеном в контуре обеспечения качества изделий на этапе производства. Она должна быть связана с аналогичными подсистемами обеспечения качества на этапах проектирования и эксплуатации изделий. Такая схема (рис.26) обеспечивает получение, обработку и обобщение информации о качестве выпускаемых предприятием изделий. Обобщение и систематизацию информации производят по результатам контроля и испытаний изделий на

всех основных стадиях жизненного цикла. Систематизированная информация служит основой для организации управляющих воздействий.

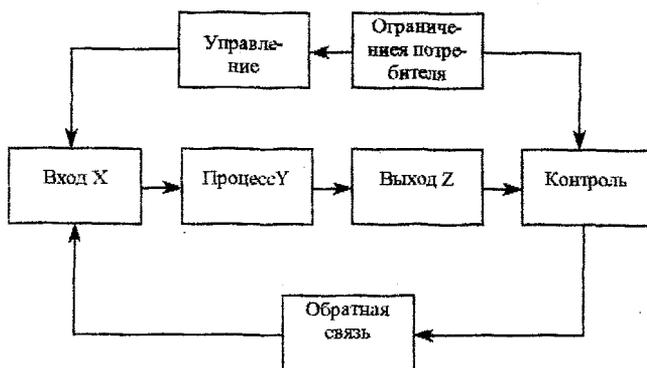


Рис.24. Структурная схема управления простым технологическим процессом

9.2.2. Управление надежностью электрорадиоизделий

Различают статическое и динамическое управление качеством и надежностью ЭРИ в радиоэлектронных средствах. Статическое управление осуществляют путем воздействия на этапы разработки, производства и применения электрорадиоизделий. Динамическое управление осуществляют с помощью воздействий на этапе эксплуатации. Им соответствуют статические и динамические системы управления.

Статическое управление может осуществляться для конкретного типа ЭРИ или для всей совокупности ЭРИ, производимых данной отраслью. Статическое управление качеством конкретных типов ЭРИ базируется на иерархической структуре, которая включает в себя на каждом периоде жизненного цикла определение прогнозируемых (перспективных, требуемых) значений показателей качества и надежности и проведение мероприятий, обеспечивающих максимально возможное (или экономически обоснованное) приближение фактически достигнутого на этом этапе значения показателя качества (надежности) к требуемому.

Такое управление имеет комплексный характер и сводится к следующим мерам:

- 1) поэтапному планированию роста показателей качества от макета до серийного изделия;



Рис.25. Структурная схема управления качеством сложного технологического процесса



Рис.26. Схема обеспечения качества

- 2) реализации плана повышения качества с использованием испытаний, анализа их результатов и введения корректирующих действий.

Показатель качества (надежности) ЭРИ можно представить в виде выходного сигнала системы управления качеством (надежностью) Y (рис.27). Здесь M – множество управляющих сигналов, Z – множество

сигналов обратной связи; Ω - множество возмущений, поступающих из окружающей среды.

Управляющая система R , представляющая собой организационную систему, в которую входят технические средства (ЭВМ и др.), люди, ресурсы и организационные каналы связи должна выработать оптимальное решение стоящей перед ней задачи и указывать средства для решения этой задачи.

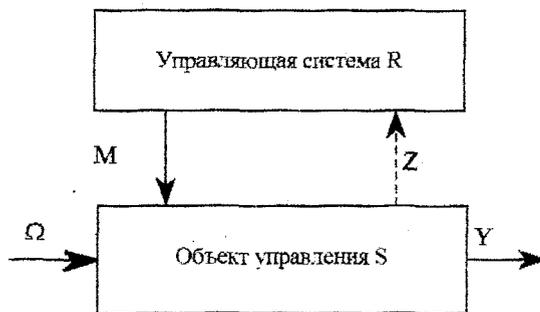


Рис.27. Система управления надежностью

При создании систем управлением качеством и надежностью используют системный подход. Он включает следующие принципы [334]:

- 1) нормирования показателей качества для каждого этапа развития системы;
- 2) взаимосвязанности всех этапов управления качеством;
- 3) адаптивности, т.е. использования гибких алгоритмов управления;
- 4) совместимости с другими системами управления (АСУТП, АСУиИ и др.);
- 5) автоматизации обработки информации для принятия решений о корректирующих действиях.

На рис.28 представлена одноуровневая многоцелевая модель управления надежностью как одного из обобщающих показателей качества ЭРИ. Каждый из этапов развития системы представлен в данном случае в виде управляющей системы R_i и объекта управления S_i . Здесь $L_i \subset L$, где L – множество координирующих сигналов, которые содержат информацию о предыдущем этапе; $W_i \subset W$, где W – множество сигналов обратной связи, поступающих от поздних этапов к более ранним; $X_i \subset X$, где X – множество входных величин.

Согласование принимаемых решений такой модели система R_i может только с соседними управляющими системами R_{i-1} и R_{i+1} . Обмен

информацией между ними и координация принимаемых решений происходит в конфликтной ситуации, когда каждая система оптимизирует свое решение. В этом случае глобальная задача – получение требуемого значения Y на выходе всей системы – будет решена неоптимально [335].

Устранить этот недостаток позволяет иерархическая двухуровневая модель управления (рис.29). Такая модель более адекватно отображает процессы, происходящие в комплексной системе управления надежностью

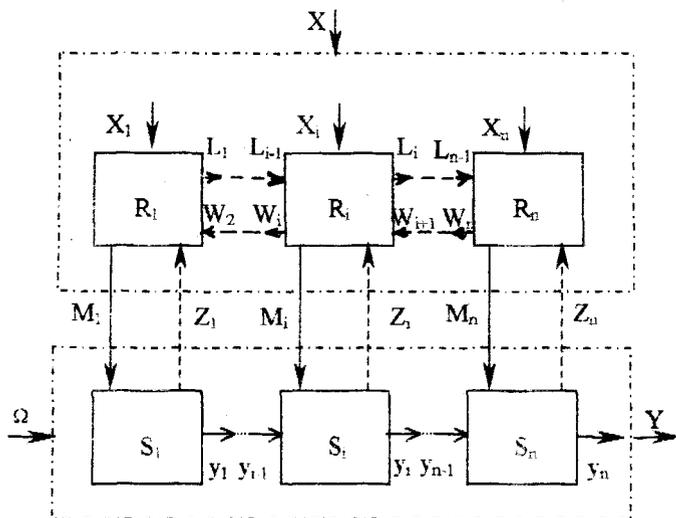


Рис.28. Одноуровневая многоцелевая модель управления надежностью

ЭРИ. В ней сделан переход от разрозненных работ по достижению требуемой надежности на каждом этапе развития системы к систематическому воздействию на весь комплекс факторов, влияющих на надежность. Эта модель позволяет решать три типа задач: глобальную (решается всей двухуровневой системой); индивидуальные, решаемые вышестоящей системой R_0 ; индивидуальные, решаемые нижестоящими системами $R_1 \dots R_n$. Вышестоящая управляющая система R_0 , которая выступает как организационная система, связывает между собой все этапы развития, разрешает конфликты, возникающие между системами, и правильно распределяет усилия между этапами.

На рис.30 представлена структурная схема комплексной системы управления надежностью ЭРИ на всех этапах развития изделия во времени.

Динамическое управление надежностью может основываться на обеспечении структурной отказоустойчивости или на динамическом

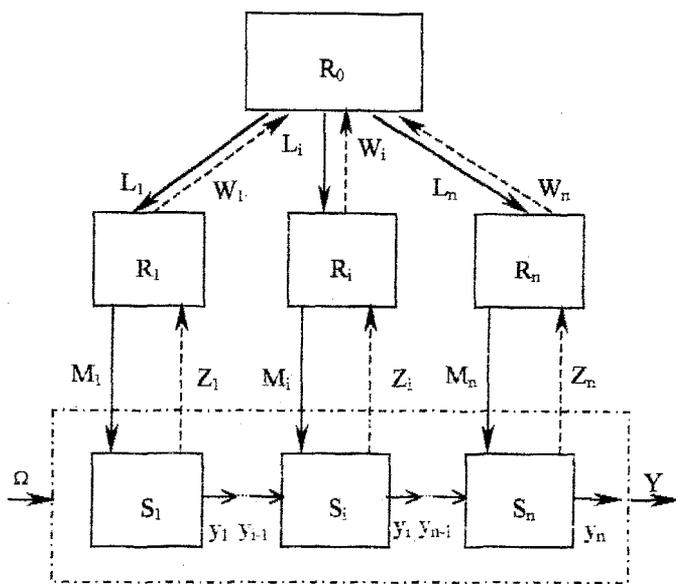


Рис.29. Двухуровневая иерархическая модель системы управления надежностью

(управляемом) включении резерва. В первом случае возникают проблемы оптимизации структуры, осуществления самоконтроля и наиболее полного использования априорной информации об отказах. Во втором случае основные проблемы сводятся к достижению требуемой достоверности выявления предвестников отказов и оптимальности использования способов включения и видов резервирования [336]. Динамическое управление надежностью ЭРИ в составе РЭС состоит в перестройке структуры аппаратуры таким образом, чтобы отказ ЭРИ не влиял (или ограничивал влияние) на ее функционирование. Оперативность перестройки структуры достигается схемотехническими решениями, объединяющими наличие отказочувствительных и отказоустойчивых элементов (рис.31). При возникновении отказа и нарушении соотношения вход - выход отказочувствительный элемент вырабатывает сигнал управления, по которому выполнение его функции переходит к отказоустойчивому элементу.

Оптимизация структуры такой системы обеспечивается выбором соответствующей конфигурации из числа реализуемых при определенных ограничениях. Поскольку для любой структуры

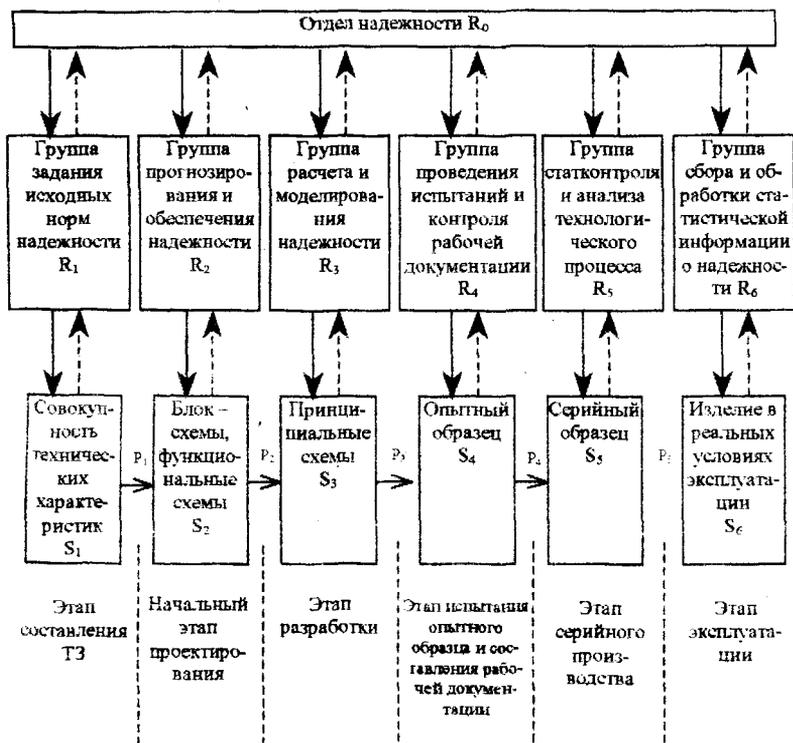


Рис. 30. Схема комплексной системы управления надежностью

существует конечное число конфигураций, то простейший метод решения заключается в прямом переборе вариантов решений.

Схемотехнические решения электронных систем управления надежностью ответственных объектов имеют необходимые элементы для использования предвестников отказов. Если в системе управления вместо диагностических сигналов ввести сигналы предвестников отказов, то можно существенно повысить надежность РЭС без изменения структуры системы и алгоритма управления [335].

Динамическое управление надежностью ЭРИ в составе РЭС включением резерва по предвестникам отказов состоит в следующем. Если обнаружено, что i – ое изделие генерирует сигнал предвестника отказа, воспринимаемый j – м средством диагностирования, то по «команде» этого средства включается тот или иной вид резерва.

Для достоверного установления отказа их целесообразно разделить на следующие группы:

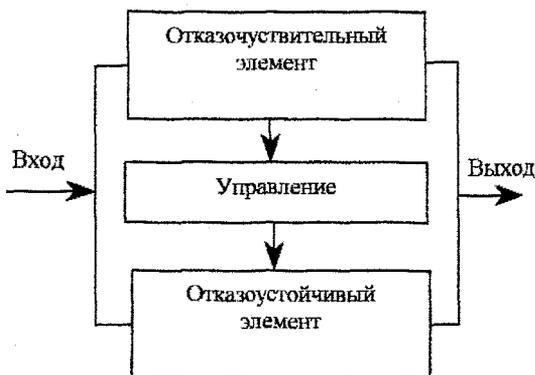


Рис.31. Схема перестройки отказоустойчивых систем

- 1) повторяющиеся; для них имеется достаточно представительный статистический материал;
- 2) типичные; для них имеются априорные данные в виде диагностических качественных или количественных моделей изделий;
- 3) случайные, для которых отсутствует представительная статистика и не имеется количественных значений частных в диагностических моделях.

Объединение систем статического и динамического управления надежностью позволяет получить комплексную систему, реализующую предельно высокие уровни безотказности и отказоустойчивости РЭС [335].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из основных проблем современного промышленного производства нашей страны является оперативная и эффективная реструктуризация производства промышленных предприятий на выпуск продукции, конкурентоспособной на внутреннем и внешнем рынке. Инструментом реформирования предприятий является внедрение систем качества и проведение их сертификации в соответствии с требованиями стандартов ИСО 9000, ИСО 9001, ИСО 9004.

Главным звеном в этой деятельности является разработка и использование новых технологий. Наиболее эффективной технологией повышения качества изделий в XXI веке должен стать таркетинг, который предусматривает использование принципиально новых технологий по всему жизненному циклу изделий. Таркетинг предусматривает структурно-функциональное построение системы качества, ориентированное на гибкость управления, четкое взаимодействие структурных звеньев, функциональную направленность на адаптацию технико-технологических процессов к экономически оптимальному удовлетворению социальных и прогнозных рыночных требований.

Технические решения должны сочетать новейшие достижения в научном и организационном плане с обеспечением экономически обоснованных уровней безопасности, надежности, совместимости и менталитетных критериев. Будут использоваться технологические решения, которые сочетают новизну процессов с экономически оптимальным выбором материалов и оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микроэлектроника: Учеб. пособие для втузов. В 9 кн./Под ред. Л.А. Коледова. Кн.8. Микроэлектронная аппаратура/Л.А. Коледов, Э.М. Ильина. – М.: Высш.шк. – 1982. – 128с.
2. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б.Ф. Высоцкого. – М.: Сов. радио. – 1978 – 352с.
3. Микроэлектроника: Учеб. пособие для втузов. В 9 кн./Под ред. Л.А. Коледова. Кн.6. Гибридные интегральные функциональные устройства/Г.А. Блинов. – М.: Высш.шк. – 1987. – 111с.
4. Микроэлектроника: Учеб. пособие для втузов. В 9 кн./Под ред. Л.А. Коледова. Кн.4. Гибридные интегральные микросхемы/Л.А. Коледов, Э.М. Ильина. – М.: Высш.шк. – 1987. – 95с.
5. Новые технологии и структуры для СБИС//Electronic Design. – 1983. – vol.31, №12. – P.87 – 96.
6. Меры по обеспечению высокой надежности ИС японского производства// Электроника. – 1980. – Т.53, №6. – С.140 – 147.
7. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры/В.Е. Власов, В.П. Захаров, А.И. Коробов; Под ред. А.И. Коробова. – М.: Радио и связь. – 1987. – 160с.
8. Гуськов Г.Я. Принципы проектирования микроэлектронной аппаратуры// Электронная промышленность. – 1976. – Т.54, Вып.6. – С.31 – 36.
9. Захаров В.П., Коробов А.И. Организация работ по обеспечению качества и надежности микросборок МЭА//Электронная техника. Сер 10 Микроэлектронные устройства. – 1981. – Вып.5.
10. Чистяков Ю.Д. Снижение температуры основных физико-химических процессов технологии микроэлектроники как путь повышения надежности ИС// Микроэлектроника. – 1980. – Т.9, Вып.6. – С.540 – 547.
11. Голото И.Д., Докучаев Б.П., Колмогоров Г.Д. Чистота в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.: Энергия – 1975. – 208с.
12. Коробов А.И. Методы и средства контроля и испытаний ГИС и их компонентов//Радиоэлектроника в 1977году Обзор по материалам иностранной печати. – М., 1978.
13. Авакян Р.А., Гаспарян Л.А., Пилинов А.Б. Оборудование для межоперационного контроля тонкопленочных ГИС//Электронная промышленность. – 1974. – Т.4, Вып.14.
14. Измерения и контроль в микроэлектронике/М.Д. Дубовой, В.И. Осокин, А.С. Очков и др.; Под ред. А.А. Сазонова. – М.: Высш.шк. – 1984. – 367с.
15. Васенков А.А., Сретенский В.Н., Федотов Я.А. Три проблемы электроники твердого тела//Микроэлектроника и полупроводниковые приборы/Под ред. А.А. Васенкова и Я.А. Федотова. – М.: Сов. радио. – 1977 – Вып.2. – С.3.
16. Микроэлектроника: Учеб. пособие для втузов. В 9 кн./Под ред. Л.А. Коледова. Кн.5. Качество и надежность интегральных микросхем/И.Я. Козырь. – М.: Высш.шк. – 1987. – 144с.

17. Готра З.Ю., Мушкарден Э.М., Смеркло Л.М. Технологические основы гибридных интегральных схем. – Львов: Вища школа. – 1977. – 168с.
18. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Методы получения конфигурации элементов ИС//Зарубежная электронная техника. – М., 1973. – №18(66).
19. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов/Под ред. А.А. Васенкова. – М.: Энергия. – 1977. – 376с.
20. Красов В.Г., Петраускас Г.Б., Чернозубов Ю.С. Толсто пленочная технология в СВЧ микроэлектронике. – М.: Радио и связь. – 1985. – 168с.
21. Ермолаев Ю.П., Пономарев М.Ф., Крюков Ю.Г. Конструкции и технология микросхем (ГИС и БГИС)/Под ред. Ю.П. Ермолаева: Учебник для вузов– М.: Сов. радио. – 1980. – 256с.
22. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ: Учеб. пособие. – М.: Высш.шк. – 1980. – 285с.
23. Сергеев В.С., Воженин И.Н. Интегральные гибридные микросхемы. – М.: Сов. радио. – 1973. – 64с.
24. Рейнолдс, Лодсон, Меллор. Единообразные технические условия на интегральные схемы, применяемые в аппаратуре дальней связи//ТИИЭР. – 1974. – Т.62. №2. – с.120.
25. Слагаемые надежности полупроводниковых приборов/Питти, Адамс, Кар-ред, Джордж, Вэлек//ТИИЭР. – 1974. – Т.62. – С.6.
26. Носов Ю.Р., Петросьянц К.О., Шилин В.А. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: Сов. радио. – 1976. – 304с.
27. Применение тестовых микросхем для оптимизации конструкции и технологи- ГИС повышенного уровня интеграции/В.П. Захаров, Б.И. Зверловлев, А.И. Коробов и др.//Электронная техника. Сер.11. Комплексная микроминиатюризация РЭ устройств и систем. – 1975. – Вып.1.
28. Оптимизация конструктивных параметров резисторов ГИС для повышения их стабильности/И.А. Колесникова, А.И. Коробов, В.А. Репин, И.А. Попов// Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических устройств и систем: Тез. докл. респ. совещ. Владимир. – 1976.
29. Магдеев Ю.Л. Оценка технического уровня технологических операций как элемент системы управления качеством технологических процессов//Электронная техника. Сер.8. Управление качеством, метрология, стандартизация. – 1978. – Вып.2 – С.23 – 28.
30. Кейджян Г.А. Прогнозирование надежности микроэлектронной аппаратуры на основе БИС. – М.: Радио и связь. – 1987. – 152с.
31. Кейджян Г.А., Мойков Р.Г. Анализ дефектов в системе обеспечения качества и надежности ИС//Электронная техника. Сер.8. – Вып.2. – 1986. – С.21 – 25.
32. Бережной В.П., Дублицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА. – М.: Радио и связь. – 1983. – 232с.
33. Валиев К.А. Проблемы создания элементной базы сверхвысокой степени интеграции для ЭВМ//Микроэлектроника. – 1980. – Т.9. Вып.6. – С.483 – 490.
34. Физика отказов. Тез. докл.//Гретье Всесоюзн. совещание. – Суздаль. – 1984. – М.: Наука. – 1984. – 176с.
35. Александян И.Т. Особенности проблем надежности микроэлектронных изделий//Электронная техника. Сер.8. – 1980. – Вып.6. – С.3 – 8.

36. Кейджян Г.А. Основы обеспечения качества микроэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь. – 1991. – 232с.
37. Климов А.К., Лопухин В.А., Шеханов Ю.Ф. Регулировка электронной аппаратуры в микроэлектронном исполнении. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд. – ние. – 1983. – 96с.
38. Монтевилло В.К., Щепкин Л.Н., Грамм С.А. Целесообразность юстировки резисторов в процессе изготовления микросхем//Электронная техника. Сер.6. – 1967. – Вып.5. – С.93 – 95.
39. Шеханов Ю.Ф. Повышение точности изготовления тонкопленочных резисторов гибридных интегральных схем//Груды ЛИАП. – Л.: ЛИАП. – 1974. – Вып.92.
40. Лопухин В.А., Шеханов Ю.Ф. Методика оптимального комплектования резистивных матриц//Электронная техника. Сер.3. – 1976. – Вып.4.
41. Лопухин В.А. Обеспечение точности электронной аппаратуры. Конструкторско-технологические методы. – Л.: Машиностроение. – 1980. – 269с.
42. Скруписки С. Функциональная подгонка параметров компонентов в гибридных схемах//Электроника. – 1972. – №8. – С.41 – 45.
43. Лопухин В.А., Поповская Я.А., Чудаковский М.П. Автоматизация функциональной подгонки гибридных интегральных микросхем//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. – 1976. – Вып.3.
44. Лопухин В.А., Шеханов Ю.Ф. О функциональной подгонке интегральных микросхем//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. – 1975. – Вып.1. – С.72 – 77.
45. Волков А.В., Пиганов М.Н. Исследование влияния функциональной подгонки на параметры ГИМС: Методич. указ. к лабор. работе. – Куйбышев. КуАИ. – 1983. – 16с.
46. Дмитриев В.Д., Меркулов А.И. Настройка режекторных РС – фильтров с распределенными параметрами//Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1971. – Том XIV, №10. – С.1213 – 1218.
47. Штыков Г.П. Функциональная подгонка гибридно-пленочных схем// Приборы и системы управления. – 1978. – №11.
48. Штыков Г.П. и др. Автоматизированная установка для подгонки гибридных интегральных ЦАП//Приборы и системы управления. – 1981. – №11.
49. Метод подгонки тонкопленочных резисторов с высокой точностью/Т.Я. Козлов, Я.Д. Мартыненко, А.П. Смирнов, К.А. Татаринов//Груды Московского ин-та электронной техники. – М.:МИЭТ. – 1971. – Вып.7.
50. Готра З.Ю., Хромьяк И.Я., Войтехов А.Н. Подгонка пленочных резисторов микросхем//Зарубежная электронная техника Сборник обзоров. – 1985 №1(284). – С.30 – 74.
51. Dybbins S. Laser Adjustment of Thick – Film Resistors//Microelectronics – 1972. – v.4, №1. – P.55 – 59.
52. А.с.477472 (СССР). Устройство для подгонки пленочных резисторов/В.А. Лопухин, Ю.Ф. Шеханов. – Опубл. в Б.И., 1975, №26.
53. А.с.261521 (СССР). Способ юстировки номиналов пленочных резисторов/И.Н. Воженин, Н.М. Егорова, П.Е. Кандыба, П.А. Фоменко. – Опубл. в Б.И., 1970, №27.

54. А.с.442517 (СССР). Устройство для абразивной подгонки пленочных резисторов/Г.С. Гельмонт, С.Е. Сас. – Оpubл. в Б.И., 1974, №33.
55. А.с.487425 (СССР). Устройство для юстировки резисторов анодированием/К.В. Таторчук. – Оpubл. в Б.И., 1975, №37.
56. А.с.476609 (СССР). Устройство для подгонки сопротивления пленочных резисторов/М.А. Одинцов, Н.Х. Кутлин, И.И. Гайнуллин и др. – Оpubл. в Б.И., 1975, №25.
57. Хидли Р. Методика лазерной подгонки резисторов. – Электроника, 1973, №13, С.55 – 60.
58. Сергеев В.П., Мурадян Э.К. Подгонка тонкопленочных резисторов// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ППО. – 1974. – Вып.4. – С.93 – 103.
59. Электроимпульсная подгонка тонкопленочных резисторов/Д.П. Колесников, Ю.Е. Орешков, Ю.П. Пердич, В.С. Бутузов. – Электронная промышленность. – 1971. – Вып.4. – С.74 – 75.
60. Schiller S., Heisig U., Panzer S. und andere. Zur Weiterentwicklung der termischen Electronen Stahl bearbeitung dunnere Schichten. – Nachrichtentechnik. – 1972. – 22, №11. – S.398 – 401.
61. Гречухин П.Ф., Коржииков В.В. Простой способ юстировки пленочных резисторов//В кн.: Микроэлектроника: Материалы 4 межвузовской всесоюзной конференции. – Таганрог. – 1972. – Вып.1. – С.198 – 200.
62. Зорин В.Ф., Фоменко П.А. Подгонка резисторов путем механической обработки слоя//Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. – 1973. – Вып.2. – С.54 – 57.
63. Северденко В.П., Лабунов В.А., Сокол В.А. Выбор оптимального режима токовой коррекции тонкопленочных резисторов//Повышение качественных показателей радио- и электронной аппаратуры. Тез. докл. научн.-техн. конф. – Минск. – 1972. – Ч.2. – С.83 – 84.
64. А.с.371621 (СССР). Устройство для подгонки тонкопленочных прецизионных резисторов/Ю.Д. Чистяков, Л.А. Ермолаев, А. Мочалов, Г.А. Франк, В.А. Демьяненко. – Оpubл. в Б.И., 1973, №12.
65. Yoshiaki T., Miyoshi H. High – Frequency – Discharge Trimming of RuO₂ – Based Thick – Film Resistors – Part II: Mechanism of Resistance Change. – IEEE//Transactions on Parts, Hybrids and Packaging, 1973. – V.9, №2. – P.94 – 104.
66. Прибор для подгонки тонкопленочных элементов микросхем/Д.И. Чернобровкин, Н.Д. Мишанин, М.Н. Пиганов и др.//Приборы и системы управления. – 1978. – №6. – С.45 – 46.
67. Прецизионная подгонка толстопленочных резисторов на основе рутения/А.В. Волков, М.Н. Пиганов, С.И. Шевченко и др.//Техника средств связи Сер. ППО. – 1985. – Вып.3. – С.75 – 80.
68. Пиганов М.Н., Меркулов А.И., Чернобровкин Д.И. Разработка и исследование способа подгонки тонкопленочных резисторов// Микроэлектроника. Межвузовский сборник. – Казань: КАИ. – 1977. – Вып.1. – С.99 – 101.
69. Кандыба П.Б., Фоменко П.А. Импульсная юстировка величины сопротивления тонкопленочных резисторов//Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. – 1972. – Вып.6. – С.56 – 60.

70. Пиганов М.Н., Волков А.В. Подгонка сопротивления толстопленочных резисторов методом факельного разряда//Техника средств связи. Сер. ТПО. – 1985. – Вып.2. – С.29 – 35.
71. Одинцов М.А., Леухин В.Н., Игумнов В.Н. Установки электроискровой подгонки толстопленочных резисторов//Техника средств связи. Сер. ТПО. – 1990. – Вып.1. – С.83 – 86.
72. Одинцов М.А., Леухин В.Н., Игумнов В.Н. Установка электроискровой подгонки резистивных элементов "Искра – 5"//Электронная промышленность. – 1989. – Вып.8. – С.56.
73. Смеркло Л.М., Дячок Д.Т. Подготовка процесса лазерной подгонки толстопленочных резисторов//Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – Украина, Одесса. – 1997. – Вып.4. – С.53.
74. Ститт Р. Измерительная схема для точной подгонки замкнутых резистивных цепей//Электроника. – 1974. – №4. – С.68-69.
75. А.с. 902084 (СССР). Способ подгонки тонкопленочных резисторов/В.Г. Федосеев, Ю.П. Белянин, Э.А. Бабичев. – Оpubл. в Б.И., 1982, №4.
76. А.с. 834784 (СССР). Устройство для токовой подгонки тонкопленочных резисторов/А.Б. Крылов. – Оpubл. в Б.И., 1981, №20.
77. А.с. 871232 (СССР). Способ подгонки пленочных резисторов/П.П. Мяконосов, Б.Д. Платонов, В.С. Хальков. – Оpubл. в Б.И., 1981, №37.
78. А.с. 900321 (СССР). Способ подгонки тонкопленочных резисторов/В.Я. Овасюк, И.В. Петров, В.С. Хальков. – Оpubл. в Б.И., 1982, №3.
79. А.с. 947928 (СССР). Способ подгонки тонкопленочных делителей напряжения/Э.Г. Маркосян, А.А. Айвазян, Р.Г. Александян и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №28.
80. А.с. 953674 (СССР). Устройство для подгонки плоских пленочных резисторов в номинал/В.И. Кравченко, В.В. Заика, О.Н. Погорелый, В.И. Попов. – Оpubл. в Б.И., 1982, №31.
81. А.с. 983766 (СССР). Устройство для индивидуальной подгонки тонкопленочных резисторов/Л.А. Стерхова, П.Б. Демин, В.А. Стерхов. – Оpubл. в Б.И., 1982, №47.
82. А.с. 1020869 (СССР). Способ подгонки тонкопленочного резистора/З.Ю. Готра, Б.А. Голдованский. – Оpubл. в Б.И., 1983, №20.
83. А.с. 1038971 (СССР). Устройство для контроля и подгонки пленочных резисторов микросхем/В.В. Коробов, В.Н. Петренко, В.А. Рождественский. – Оpubл. в Б.И., 1983, №32.
84. А.с. 1182583 (СССР). Устройство для подгонки пленочных резисторов/К.В. Таторчук. – Оpubл. в Б.И., 1983, №36.
85. А.с. 1085425 (СССР). Способ лазерной подгонки пленочных элементов интегральных схем и устройство для его осуществления/В.И. Кравченко, В.В. Заика, В.И. Попов и др. – Оpubл. в Б.И., 1985, №3.
86. А.с. 1180989 (СССР). Способ температурной компенсации сопротивления резистора/М.Г. Копылова, М.И. Смирнов, В.А. Заславский и др. – Оpubл. в Б.И., 1985, №35.

87. А.с. 1246146 (СССР). Устройство для подгонки плоских пленочных резисторов в номинал/В.И. Кравченко, В.В. Заика, О.Н. Погорелый и др. – Оpubл. в Б.И., 1986, №27.
88. А.с. 1392598 (СССР). Устройство для подгонки кодоуправляемых пленочных резисторов/И.П. Опманис, Э.Э. Родэ, Я.Я. Веманис и др. – Оpubл. в Б.И., 1988, №16.
89. А.с. 1549386 (СССР). Способ подгонки величины сопротивления пленочных резисторов гибридных интегральных микросхем/Г.Ф. Жуков, В.К. Смолин. – Оpubл. в Б.И., 1996, №1.
90. Патент 1773704 (Россия). Способ подгонки тонкопленочных резисторов в номинал/В.В. Иванов. – Оpubл. в Б.И., 1994, №20.
91. Пиганов М.Н., Бузов Н.И., Лофицкий И.В. Автоматизированная установка для подгонки толстопленочных резисторов//Техника средств связи. Сер. ТПО. – 1989. – Вып.2. – С.50-53.
92. Пиганов М.Н., Чернобровкин Д.И., Паутов А.М. Подгонка тонкопленочных резисторов путем уплотнения резистивного слоя//Обмен опытом в радиопромышленности. – 1976. – Вып.2. – С.34 – 37.
93. Luby S. Justovanie vistvovych odpornikov a kondensatorov//Sdelov. Tehn. – 1972. – 20. – №8. – Str.305 – 306.
94. Scrupski S.E. Functional Trimming Gains Economies for Hybrid Jcs.// Electronics. – 1972. – V.45, №8. – P.102 – 108.
95. А.с.357607 (СССР). Способ регулирования емкости тонкопленочного конденсатора/В.П. Попов, Е.А. Бузницкий. – Оpubл. в Б.И., 1972, №33.
96. Некоторые технические приложения особенностей пробыа структур металл-диэлектрик-металл/В.И. Карасев, А.И. Коробов, Л.А. Митряев и др.// Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. – 1972. – Вып.2. – С.16 – 20.
97. Патент Японии №55 – 27453.
98. Патент Японии №55 – 43617.
99. Готра З.Ю., Лозинский Ю.Т. Подгонка тонкопленочных конденсаторов микросхем//Зарубежная электронная техника. Сборник обзоров – 1985. – №1(184). – С.12 – 29.
100. Патент Великобритании №1281715.
101. Патент Японии №55 – 43618
102. Патент США №4207138.
103. Патент Японии №51 – 32823.
104. Патент Франции №2481517.
105. Патент Франции №2156413.
106. Патент Швейцарии №635460.
107. Патент Франции №2127387
108. Патент Японии №56 – 2771.
109. Патент ФРГ №1938767.
110. Пиганов М.Н. Электронская подгонка тонкопленочных конденсаторов// Сборник научных трудов. – Куйбышев:КуАИ. – 1975. – С.95 – 100.
111. Палатник Л.С., Сорокин В.К. Материаловедение в микроэлектронике. – М.: Энергия. – 1977. – 280с.

112. Палатник Л.С., Сорокин В.К. Основы пленочного полупроводникового материаловедения. – М.: Энергия. – 1973. – 296с.
113. Толстопленочная микроэлектроника/Гребенкина В.Г., Доброер В.С., Панов Л.И., Гризина Ю.П. – Киев: Наукова думка. – 1983. – 248с.
114. Дюбуа. Современные пассивные компоненты// Электроника. – 1974. – №11. – С.25 – 47.
115. Бочкарев Б.А., Бочкарева В.А. Керметные пленки//Энергия. – Л. – 1975. – 152с.
116. Шнарович Е.И., Рыбинский О.А., Злобин В.А. Диэлектрики интегральных схем//Энергия. – М. – 1975. – 120с.
117. Трусов Л.И., Холмянский В.А. Островковые металлические пленки// Металлургия. – М. – 1973. – 320с.
118. "Electronic Components". – 1975. – №17. – Р. 9.
119. Курносое А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. – М.:Выш.шк. – 1975. – 342с.
120. Ефимов Е.И. Современная микроэлектроника. – М.:Советское радио. – 1973. – 112с.
121. Васильев Ю.И. и др.//Электронная техника. Сер.14. Материалы. – 1973. – Вып.4.
122. Готра З.Ю. и др. Приборы и системы управления. – 1975. – №11
123. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники//Машиностроение. – 1976
124. Орешкин П.Г. и др. Физика полупроводников и микроэлектроника. – 1976 – Вып.2.
125. Koil – Stepniewska Lubemila Pr. nauk. Inst. techn. electron. – 1974. – №12.
126. Акт. Заявка ФРГ, кл.21с – 54/05 №1640082 от 15.03.1973//Изобретения за рубежом. – 1973. – №5.
127. Бочкарев Б.А., Александрович Г.Е. Низкоомные тонкопленочные резисторы микросхем на основе сплава МЛТ–30, полученные испарением с УТТГ//Обмен опытом в радиопромышленности – 1972. – №2. – С.17.
128. Патент США, кл. 338 – 262, №3784951 от 8.01.74//Изобретения за рубежом. – 1974. – №1
129. Заявка Франции №2236438 от 1.04.1975//Изобретения за рубежом. – 1975. – №8.
130. Патент Японии, кл. 62A222, №48-39638 от 26.11.73//Изобретения за рубежом. – 1974. – №2.
131. Травкин Н.Н. и др.//Электронная техника. Сер.14. Материалы. – 1974. – Вып.6.
132. Акт. заявка Японии, кл. 62A221, №48 – 13316 от 21.01.72//Изобретения за рубежом. – №15
133. Rai S T., Marton J.P Electronics. – 1973. – №6.
134. Кондратов Н.М. и др.//Электронная техника Сер 3 Микроэлектроника – 1972. – Вып.6
135. Патент Японии, кл.62A222, №37 – 90913 от 5.02.74//Изобретения за рубежом. 1975. №1.

136. Thin Solid Films. – 1972. – 11, №2.
137. Черняев В.Н. и др. Авторское свидетельство СССР, кл. НО1/С – 7/04, №442516 от 3.05.1973, опубликовано 5.09.74, бюллетень №33.
138. Крыжановский Б.П. и др. Авторское свидетельство СССР, кл. НО1/С – 7/00, №333610 от 20.07.71, опубликовано 21.03.1972, бюллетень №11.
139. Патент Японии. №49-9839. кл.62A222 от 6.03.1974//Изобретения за рубежом – 1975. – №16.
140. Чернобровкин Д.И. и др.//Электронная техника. Сер.5. Радиодетали и компоненты – 1977. – Вып.8.
141. Мартюшов К.И. Технология производства резисторов. – М.: Энергия. – 1972.
142. Ермолаев Л.А. и др.//Электронная техника. Сер.6. Микроэлектроника – 1972. – Вып.5.
143. Лукьянова Э.Я. и др.//Электронная промышленность. – 1974. – №5.
144. Кондратов Н.М. и др.//Электронная техника. Сер.14. Материалы. – 1972. – Вып.4.
145. Кондратов Н.М. и др. Авторское свидетельство СССР, кл. НО1/С – 7/00, №376816 от 20.01.72, опубликовано 5.04.1973, бюллетень №17.
146. Кондратов Н.М. и др.//Электронная техника. Сер.6. Микроэлектроника. – 1974. – Вып.10(11).
147. Патент США №3790913 от 5.02.1974, кл.338-308//Изобретения за рубежом. – 1974. – №3.
148. Гаврилов С.Н., Никулин С.М. Микроэлектроника. – М.: Энергия. – 1970. – 80с.
149. Акц. Заявка ФРГ, кл.24с-54/05, №1450927 от 12.04.73 //Изобретения за рубежом. – 1973. – №7
150. Kata Takeshi, Tugtsu Sct. and Tesh.J. – 1974. – 10, №2.
151. Соколов Б.П. и др. Авторское свидетельство СССР, кл. НО1с, 7/00, №357600 от 21.01.71, опубликовано 31.01.72, бюллетень №33.
152. А.с. 531197 (СССР). Резистивный материал/Д.И. Чернобровкин, М.Н. Пиганов, А.Д. Хромов и др. – Опубл. в Б.И., 1976, №37.
153. Чернобровкин Д.И., Волкова В.В. Физика и химия обработки материалов. – 1977.
154. Чернобровкин Д.И. и др.//Электронная промышленность. – 1976. – №5.
155. Бочкарев Б.А. и Бочкарева В.А. Авторское свидетельство №491945, кл. НО1с, 7/00, опубликовано 1.12.1975.
156. Готра З.Ю. и др.//Обмен опытом в радиопромышленности. – 1975. – №3.
157. Лигчинский А.Г. Микроэлектроника. – 1974. – том 3, Вып.5.
158. Демин В.В., Гореликов Н.И., Готра З.Ю. Пленочные микросхемы и миниатюризация. – Львов: Изд-во "Каменьяр". – 1972. – 87с.
159. Ирмин А.Р. и др.//Обмен опытом в радиопромышленности. – 1973. – №4.
160. Готра З.Ю. Тонкопленочные конденсаторы с 2-х слойным диэлектриком системы SiO–GeO//Обмен опытом в радиопромышленности. – 1973. – №7. – С.86 – 88.
161. Сергеев В.С., Воженин И.Н. Интегральные гибридные микросхемы. – М.: Советское радио. – 1973. – 64с.

162. Мухачев В.А., Хатников В.И. Об образовании сквозных отверстий в электродах и микротрещин в диэлектрической пленке при термообработке тонкопленочной системы Al-SiO-Al//Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. - 1973. - Вып.1.
163. Криков В.С. и др. Авторское свидетельство №180705 кл.21, 10/12, от 20.01.65, опубликовано 26.03.1966, бюллетень №8.
164. Семин А.С. и др. Известия ВУЗов//Радиоэлектроника. - 1975. - том 18, Вып.12.
165. Чернобровкин Д.И. и др. Микроэлектроника. - 1973. - том 2, Вып.1.
166. Корзо В.Ф., Курочкин В.А., Демин В.П. Пленки из элементоорганических соединений в радиоэлектронике. - М.:Энергия. - 1973. - 196с.
167. Аникин М.И. и др.//Электронная техника. Сер.3 Микроэлектроника. - 1975. - Вып.2.
168. Бондарев В.П. и др.//Электронная техника. Сер.6. Микроэлектроника. - 1975. - Вып.6.
169. Ведерников В.А., Данилина Т.И. Микроэлектроника. - 1973. - т.2, Вып.3.
170. Чернобровкин Д.И.//Электронная техника. Сер.5. Радиодетали компоненты. - 1974. - Вып.1. - С.3 - 7.
171. Чистяков Ю.Д., Заичкин Н.Н. Микроэлектроника. - 1975. - т.4, Вып.2.
172. Заичкин Н.Н. и др.//Электронная техника Сер.6 Микроэлектроника. - 1973. - Вып.8(48).
173. Хромов А.Д. и др.//Электронная техника. Сер.14. Материалы. - 1974. - Вып.12.
174. Кудинь А.П. и др. в сб. Конструирование и производство РЭА. - Рига. - 1974. - Вып.1.
175. Красов В.Г., Хромов А.Д. и др. Авторское свидетельство №476614, кл.НО1 3/06, от 1973, опубликовано 17.11.75.
176. Чернобровкин Д.И.//Электронная техника. Сер.5. Радиодетали компоненты. - 1976. - Вып.4(17).
177. Канозеева М.Г., Теньгушев В.С. Известия ЛЭТИ. - Л. - 1973. - Вып.131.
178. Диденко В.Д. и др.//Электронная техника. Сер.14. Материалы. - 1974 - Вып.1.
179. Заявка Японии, кл.59E10124 №49-1906101 15.05.74.//Изобретения за рубежом. - 1974. - №12.
180. Северденко В.П. и др. Микроэлектроника. - М.:Советское радио. - 1973. - Вып.6.
181. Толфер М. Микроэлектроника тонкими пленками. М.:Мир - 1973 - 260с.
182. Хамер Д., Битгерс Дж. Технология толстопленочных гибридных интегральных схем. - М.:Мир - 1975 - 496с.
183. Красов В.Г., Колдашев Н.Д., Петраускас Г.В. Пасты в микроэлектронике//Обзоры по электронной технике. - М.: ЦНИИ "Электроника". - 1976. - Вып.2. - 56с.
184. Джоветт Ч.Е. Технология тонких и толстых пленок для микроэлектроники. - М.:Металлургия. - 1980. - 59с.
185. Красов В.Г., Петраускас Г.Б., Чернозубов Ю.С. Толстопленочная технология в СВЧ микроэлектронике. - М.:Радио и связь. - 1985. - 168с.

186. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы. Материалы, приборы, изготовление. – М.: Мир. – 1985. – 504с.
187. Бушминский И.Д. Морозов Г.В. Технология гибридных интегральных схем СВЧ. – М.: Высшая школа. – 1980. – 285с.
188. Бушминский И.П., Морозов Г.В. Конструирование и технология пленочных СВЧ микросхем. – М.: Сов. радио. – 1978. – 144с.
189. Андропова Р.Е., Демин О.Н., Морозова Т.М. и др. Резистивные материалы на основе молибденсодержащих стекол//Электронная техника. – 1986. – Вып.1(177). – С.107.
190. Виницкий И.М., Рудь Б.М., Тельников Е.Я. Свойства толстых резистивных пленок на основе BaV_6-LaV_6 //Электронная промышленность. – 1987. – Вып.6. –С.5.
191. Бескова Э.С., Сахарова Т.П. Контроль содержания серебра и палладия в серебропалладиевых пастах//Электронная техника. – 1985. – Вып.10. – С.69.
192. Захарова Т.И., Красникова Г.В. Спектрографическое определение примесей в спеклах на основе RuO_2 со стеклом системы $PbO-SiO_2-Zn_2O_3-ZnO-SiO_2$ // Электронная техника. – 1987. – Вып.1(222). – С.73.
193. Зуев А.В., Сайфуллин В.Х. Исследование проводимости толстопленочных резисторов.//Сб. Комплексная миниатюризация резисторов РЭА и ЭВА. – Казань: КАИ. – 1985. – С.93.
194. А.с. 1096701 (СССР). Способ приготовления толстопленочных резисторов/ В.Г. Недорезов, В.В. Куренчанин, С.В. Подшибякин. – Оpubл. в Б.И., 1984, №21.
195. А.с. 834777(СССР). Резистивный материал/Г.В. Бадуев, О.В. Макарова, Г.П. Швейкин. – Оpubл. в Б.И., 1984, №20.
196. А.с. 801116 (СССР). Резистивный материал/В.И. Безруков, М.П. Дубинина, М.Е. Голоденко и др. – Оpubл. в Б.И., 1981, №4.
197. А.с. 951414(СССР). Материал для терморезисторов с отрицательным ТКС/ И.А. Кудренко, В.Н. Трошева, Е.Г. Снегова и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №30.
198. А.с. 957284(СССР). Резистивная композиция/Ю.П. Тризна, Л.И. Панов, В.Н. Федоров и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №33.
199. А.с. 960966(СССР). Резистивная композиция/Ю.П. Минатчене, В.Б. Симанавичене, К.В. Садаукас. – Оpubл. в Б.И., 1982, №35.
200. А.с. 945907(СССР). Резистивный материал/Г.П. Потепникова, В.С. Пчелина, З.Э. Воложинская и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №27.
201. А.с. 898517(СССР). Материал для резисторов/З.М. Пуронене, В.Г. Красов, Г.В. Турчина и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №2.
202. А.с. 960969(СССР). Резистивный материал и способ изготовления резисторов на его основе/Г.М.Б. Абдуллаев, В.П. Горелов, Е.В. Дмитриев и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №35.
203. А.с. 1048523(СССР). Резистивный материал/Г.М. Иванов, Ю.П. Юсов, О.А. Троицкая и др. – Оpubл. в Б.И., 1983, №38.
204. А.с. 1008803(СССР). Терморезистивный композиционный материал/В.И. Безруков, М.П. Дубинина, М.Е. Голоденко и др. – Оpubл. в Б.И., 1983, №12.

205. А.с. 1107179(СССР). Материал для терморезисторов/Л.П. Мельников, Л.Н. Комиссарова, Е.Г. Заугольников, Ш.Б. Ибрагимов. – Оpubл. в Б.И., 1984, №29.
206. А.с. 107315(СССР). Композиционный материал для толстопленочных резисторов/М.Ю. Блесткин, С.Ф. Казанцев, О.С. Денисова и др. – Оpubл. в Б.И., 1984, №7.
207. А.с. 1073806(СССР). Терморезистивный композиционный материал/В.И. Безруков, М.П. Дубинина, М.Е. Голоденко и др. – Оpubл. в Б.И., 1984, №6.
208. А.с. 1173450(СССР). Состав для резистивного материала/Г.Г. Рудовол, Н.Д. Колдашов, А.Н. Марченко и др. – Оpubл. в Б.И., 1985, №30.
209. Заявка Франции, кл. Н01с 7/04, №2598021, 1987.
210. Патент США, кл. Н01с 1/012, №4651126, 1987.
211. А.с. 879657(СССР). Резистивный материал/Т.В. Проценко, А.И. Левкин, Т.И. Макевнина. – Оpubл. в Б.И., 1981, №41.
212. А.с. 894802(СССР). Резистивная паста/Ю.А. Гусев, Д.Ф. Симбирский, Л.С. Григорьев и др. – Оpubл. в Б.И., 1981, №48.
213. А.с. 841068(СССР). Резистивная паста/В.И. Безруков, М.П. Дубинина и др. – Оpubл. в Б.И., 1981, №23.
214. А.с. 911629(СССР). Резистивный материал/З.М. Пуруноне, В.Г. Красов, Н.Д. Колдашов и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №9.
215. А.с. 1003156(СССР). Резистивный материал/И.М. Ленных, Ф.В. Макордей, Т.И. Шапкина. – Оpubл. в Б.И., 1983, №9.
216. А.с. 902082(СССР). Резистивный материал/Ф.В. Макордей, И.М. Ленных. – Оpubл. в Б.И., 1982, №4.
217. Патент Японии №62-1003, 1987.
218. А.с. 871230(СССР). Резистивный материал/В.С. Баткова, И.Л. Гандельсман. – Оpubл. в Б.И., 1987, №37.
219. А.с. 942174(СССР). Резистивный материал/Л.Т. Акулова, Б.М. Рудь, М.Д. Смолин и др. – Оpubл. в Б.И., 1982, №25.
220. Андропова Р.Е., Демин О.Н., Морозова Т.И. и др. Толстопленочные резисторы на основе молибденсодержащих стекол и боридов молибдена// Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. – 1987. – Вып.2(222). – С.101.
221. Смирнов М.А., Пахомов В.Ф., Демин О.Н. Толстопленочные резисторы на основе боридов металлов и стекла//Обзоры по электронной технике. Сер. Материалы. – 1972. – Вып.6. – С.66.
222. Атанасянц А.М., Демин О.Н., Афанасьев А.А., Гречнев А.А. Резистивный материал для высокоомных толстопленочных резисторов//Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности. – 1973 – Вып.3 – С.20
223. Гребенкина В.Г., Лемза В.Д., Панов Л.И. Резистивные пасты серии 7000 для толстопленочной технологии//Информационный листок о научно-технических достижениях, №86 – 0383 (рубрика 47.13.09). – М.:ВИМИ. – 1986.
224. Кофстад Л. Отклонение от стехиометрии, диффузия и электропроводность в простых оксидах металлов. – М.:Наука. – 1975. – 396с.

225. Лазарев В.Б., Красов В.Г., Шапильгин И.С. Электропроводность окисных систем и пленочные структуры. – М.:Наука. – 1979. – 168с.
226. Гинзбург С.И., Езерская Н.А., Прокофьева И.В. и др. Аналитическая химия платиновых металлов. – М.:Наука. – 1972. – 613с.
227. Ливингстон С. Химия рутения, родия, палладия. – М.:Мир. – 1978. – 366с.
228. Руководство по неорганическому синтезу/Под ред. Г. Брауэра. – М.:Мир. – 1985. – Т.4. – 1089с.
229. Масленицкий И.Н., Чутаев Л.Б. и др. Металлургия благородных металлов. – М.:Металлургия. – 1982. – 431с.
230. А.с. 1103296(СССР). Резистивная паста/Т.А. Бутузова, П.П. Мельников, Л.Н. Комиссарова и др. – Опубл. в Б.И., 1984, №26.
231. Руководство по неорганическому синтезу/Под ред. Г. Брауэра. – М.:Мир. – 1985. – Т.5. – 1851с.
232. Никольский А.В., Рябов А.Н. ЖНХ. – 1965. – Т.10. – С.3.
233. Самсонов Г.В., Константинов В.И. Тангал и ниобий. – М.:Металлургия. – 1985. – 263с.
234. А.с. 834781(СССР). Резистивный материал/З.М. Пуронене, В.Г. Красов, Н.Д. Колдашов и др. – Опубл. в Б.И., 1981, №20.
235. А.с. 1005196(СССР). Резистивная паста/В.И. Безруков, М.П. Дубинина, М.Е. Голоденко и др. – Опубл. в Б.И., 1983, №10.
236. А.с. 945908 (СССР). Резистивный материал/Г.П. Потапникова, В.С. Пчелина, З.Э. Воложинская и др. – Опубл. в Б.И., 1982, №27.
237. А.с. 970484(СССР). Резистивная композиция/Ю.П. Миналгене, В.Б. Симанавичене, К.В. Садаукас. – Опубл. в Б.И., 1982, №40.
238. Переменные толстопленочные резисторы/Под ред. М.Д. Смолина. – Киев.: Наукова думка. – 1985. – С.162.
239. Руководство по неорганическому синтезу/Под ред. Г. Брауэра. – М.: 1985. – Т.3. – 1056с.
240. Самсонов и др. Бориды. – М.: Атомиздат. – 1975. – С.558.
241. Демин О.Н., Атанасьянц А.М. Рентгенофазовый анализ превращений бориды молибдена при его термообработке//Сб. Репорт. – М.:ВИМИ – 1975 – Вып.15.
242. А.с. 978204(СССР). Стекло для резисторов/В.З. Петрова, Р.Ф. Шутова, Т.М. Морозова и др. – Опубл. в Б.И., 1982, №44
243. А.с. 765219(СССР). Стекло/В.З. Петрова, Р.Ф. Шутова, Т.М. Морозова и др. – Опубл. в Б.И., 1980, №35.
244. Трунов А.А., Титов В.А. Диагностический монитор для расчета термодинамических равновесий в системах с фазами постоянного состава// Применение математических методов для описания и изучения физико-химических равновесий: Тезисы докладов Всесоюзной школы. Ч.2. – Новосибирск. – 1989. – С.124.
245. Данилин Б.С. Вакуумная техника в производстве интегральных схем. – М.: Энергия. – 1972. – 256с.
246. Минаков В.И., Коган М.З. Производство тонкопленочных микросхем. – Л.: Энергия. – 1973. – 176с.

247. Пьезоэлементы для контроля толщины и скорости вакуумного напыления тонких пленок/Е.О. Фрейеров, С.Ф. Травкина, В.В. Безделкин, В.Б. Грузиненко//Электронная техника. Сер.5. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1988. – Вып.3. – С.71 – 73.
248. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность//Учеб. пособ. – М.:Высш. шк. – 1986. – 464с.
249. Толстопленочная микроэлектроника/Гребенкина В.Г., Доброер В.С., Попов Л.И., Тризна Б.П. – Киев:Наукова думка. – 1983. – 248с.
250. Гребенкина В.Г., Юсов Ю.П., Сорокин В.Н. Объемные резисторы. – Киев: Наукова думка. – 1976. – 210с.
251. А.с. 569908(СССР). Устройство для определения объемного содержания гранул заданной фракции/ В.С. Гунько, В.Д. Тюпин. – Оpubл. в Б.И., 1977, №31.
252. Паничкина В.В., Уварова И.В. Методы контроля дисперсности и удельной поверхности металлических порошков. – Киев:Наукова думка. – 1973. – 168с.
253. Пат. 3944797 (США). Method and apparatus for determining the correct percentiles of the size distribution of a particulate system/ W.H. Coulter, W.R. Hogg. – Оpubл. 16.03.76.
254. Fautz M. Eine Meßmethode für teilchengroßen analusen im durchmesserbereich zwischen 10µm und 0,05µm. – Chem. Ing Techn. – 1978. – 50, №1. – S.47.
255. Учитель Г.С., Пекарский А.А., Пустобаев А.А. Устройство контроля влажности сыпучих материалов термографическим методом//Труды Новочеркасского политехнического института. – Новочеркасск:НПИ. – 1975. – С.314 – 317.
256. Методы спектрального анализа/Под ред. В.Л. Левшина. – М.:Изд-во Моск. ун-та. – 1962. – 509с.
257. Холева Л.Д., Шкиров В.С. Методы электронной спектроскопии для анализа материалов электронной техники//Зарубежная электронная техника. – 1979 – №4 – С 3 – 33
258. Крутинин А.Н. Толстопленочные микросхемы. – Рязань:РПТИ. – 1977. – 76с.
259. Основные тенденции в производстве гибридных интегральных схем// Радиоэлектроника за рубежом. – 1978. – Вып. I. – С.8 – 20.
260. Электрофизические диагностирование элементов радиоэлектронной аппаратуры/Бережной В.П., Юсов Ю.П., Ходневич С.П. и др. Под общ. ред. Бережного В.П. – М.:ЦНИИ "Электроника". – 1990. – 304с.
261. Сердюк Г.Б. Электрофизические методы диагностирования в задачах обеспечения качества и надежности электрорадиоизделей. – Киев: Знание. – 1968.
262. Берман Л.С. Емкостные методы исследования полупроводников – М: Наука. – 1972. – 104с.
263. Колешко В.М., Гойленко П.П., Буйко Л.Д. Контроль в технологии микроэлектроники. – Минск: Наука и техника. – 1979.
264. Comizzoli USES of corona discharges in the semiconductor industry. AT&T Bell Laboratories. Murray Hill, New Jersey 07974

265. Преженцев М.Д., Рыскин Е.Э., Барунова Н.М., Тимохин И.В. Диагностика транзисторных структур с дефектами защитных покрытий методом наведенного заряда//Электронная техника. Сер.8. – 1987. – Вып.3(126).
266. Рыскин Е.Э., Чухлеб А.П., Токман В.И., Барунова Н.М., Преженцев М.Д., Тимохин И.В. Измерение параметров транзисторов при повышенной температуре с помощью тестера 14ТКС – 100 – 001//Электронная техника. Сер.8. – 1982. – Вып.3(126).
267. Ждан А.Г., Мухин В.В., Никитин Н.Е., Синкевич В.Ф. Определение электрофизических параметров МДП структур//Электронная техника. Сер.8. – 1985. – Вып.3(114).
268. Воронков И.Е. Диагностика полупроводниковых приборов методом второй производной ВАХ при тестовых воздействиях на приборы//Электронная техника. Сер.8. – 1984. – Вып.3(114). – С.3 – 7.
269. Билитаев А.П., Евдокишкин Е.В., Шахурин А.Б. Спектрометр глубоких уровней в полупроводниках, выполненных на базе стандартных приборов// Электронная техника. Сер.2. – 1987. – Вып.3.
270. Нахмансон Р.С., Ерков В.Г. Измерение емкости и проводимости структур металл-диэлектрик-полупроводник на звуковых и инфракрасных частотах. – ПТЭ. – №3.
271. Бердичевский Б.Е., Дубицкий Л.Г., Сушинцев Г.М., Агеев Ю.П. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры/Под ред. Б.Е. Бердичевского. – М.: Сов. радио. – 1976. – 294с.
272. Данилин Н.С., Гусев Л.И., Загоровский Ю.И. и др. Обеспечение качества РЭА методами диагностики и прогнозирования. – М.: Из-во стандартов. – 1983. – 223с.
273. Белкина Л.Н., Брайко Л.Г., Веснина А.И., Кабанов В.С., Назарова Т.Н., Тарло М.Н. Анализ брака и отказов ИС//Обзоры по электронной технике. Сер.8. – 1979. – Вып.2.
274. Геликман Б.Ю., Кристаллинский Л.П., Захарова О.Г., Алеференко Т.Д. Исследование информативных параметров тонкопленочных резисторов// Электронная техника. Сер.8. – 1975. – Вып.11(41).
275. Сердюк Г.Б., Кольченко Е.О., Идиев С.Е. Флуктуационное диагностирование скользящих композиционных контактов//Электронная техника. Сер.8. – 1985. – Вып.3(114).
276. Неразрушающий контроль элементов и узлов радиоэлектронной аппаратуры/Б.Е. Бердичевский, Л.Г. Дубицкий, Г.М. Сушинцев, А.П. Агеев.: Под ред. Б.Е. Бердичевского. – М. Сов. радио. – 1976. – 296с.
277. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. – М.: Изд. – во иностр. Литер. – 1961. – 232с.
278. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. – М.: Энергия. – 1972. – 153с.
279. Ван дер Зил А. Шум. – М.: Сов. радио. – 1973. – 226с.
280. Малахов А.Н., Якимов А.В. К вопросу о природе фликкерных флуктуаций// Радиотехника и электроника. – 1974. – №11. – С.2436 – 2438.
281. Корреляция между НЧ токовыми шумами и стабильностью тонкопленочных резисторов/С.О. Острова, Т.П. Тогулева, И.Г. Леонтьева и др.//Электронная

- техника. Сер. Полупроводниковые приборы. – 1974. – Вып.10. – С.115 – 119.
282. Воробьев М.Д., Клейнер Э.Ю. О природе фликкер-шума оксидного катода// ЖТФ. – 1975. – Т.10. – Вып.7. – С.1482 – 1484.
283. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. – М.: Энергия. – 1978. – 112с.
284. Ван дер Зип А. Прогнозирование момента отказа по низкочастотному шуму транзистора//Электроника. – 1966. – №24. – С.38 – 41.
285. Са. Теория генерации НЧ шума в полевых транзисторах с плоскостным затвором//ТИИЭР. – 1964. – №7. – С.849 – 862.
286. Пряников В.С. О возможности прогнозирования отказов по низкочастотным шумам//Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1969. – №10. – С.1198 – 1201.
287. Мангир Т.З. Источники отказов и повышение выхода годных СБИС. Восстановление соединений СБИС и СБИС пластинах//ТИИЭР. – 1984. – 72, №6.
288. Гусев В.А., Молчанов Э.Д. Физико-технический подход и проблеме обеспечения и прогнозирования надежности//Электронная техника. Сер.8. – 1988. – Вып.2(129).
289. Гамелей П.С., Юдин Б.В. Прогнозирование надежности изделий электронной техники на основе информативных параметров// Обзоры по электронной технике. Сер.8. – 1979. – Вып.1(619).
290. Бурова Д.Н., Коекин А.И., Софизкий Г.Г. Корреляционный алгоритм определения параметров, прогнозирующих надежность интегральных схем// Электронная техника. – 1972. – Вып.4. – С.129 – 136.
291. Пиганов М.Н., Голосеев О.Ю., Побожный А.В. Установка диагностического контроля бескорпусных операционных усилителей//Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем. Сб. докладов междунар. НТК. – Пенза. – 1997. – С.31 – 32.
292. Архипов А.В., Пиганов М.Н., Капитонов В.А. Диагностический неразрушающий контроль микросхем серии 764//Актуальные проблемы анализа и обеспечения надежности и качества приборов, устройств и систем. Сб. докладов междунар. НТК. – Пенза – 1997. – С.35
293. Соколов А.В., Федоров В.К. Контроль диэлектрических пленок методом электрической индукции//Дефектоскопия. – 1988. – №4. – С.22 – 26.
294. А.с. 762044 (СССР). Способ отбраковки конденсаторов с оксидным диэлектриком/М.Н. Дьяконов, В.М. Муждаба, И.В. Неплюский и др. – Опубл. в Б.И. 1980, №33
295. Применение инфразвуковой спектроскопии для диагностики оксидного диэлектрика танталовых электролитических конденсаторов/В.М. Браде, Г.В. Гессен, М.Н. Дьяконов и др.//Электронная техника. Сер.5. Радиодетали и радиокомпоненты – 1984. – Вып.2. – С.10 – 13.
296. А.с. 930406 (СССР). Способ отбраковки конденсаторов с оксидным диэлектриком/М.Н. Дьяконов, В.М. Муждаба, И.В. Неплюский и др. – Опубл. в Б.И. 1982, №19.
297. А.с. 997113 (СССР). Способ отбраковки конденсаторов с оксидным диэлектриком/М.Н. Дьяконов, Ю.С. Капшин, В.М. Муждаба и др. – Опубл. в

- Б.И., 1983, №6.
298. А.с. 254188 (СССР). Способ обнаружения дефектов в изделиях из электроизоляционных материалов/Б.А. Кулик, И.Д. Николаенко, Р.В. Чайкина. – Оpubл. в Б.И., 1969, №31.
 299. Biancomano V. Screening Method Points to causes of Low Voltage Failure in MLC Capacitors//Electronic Design. – 1983. – V.31, №13. – P.47 – 48.
 300. Chittick R.C., Gray E., Alexander J.H. Nondestructive Screening for Low Voltage in Multilayer Ceramic Capacitors//IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology. – 1983. – CHMT – 6, №4. – P.510 – 516.
 301. Острова С.О., Митряев Г.И. Модуляционный шумомер для исследования резистивных структур//Метрология и измерительная техника. – 1976. – №8.
 302. Злагоустов С.В., Острова С.О., Асадулина В.Р. Измерение токовых шумов как метод контроля качества микропленочных резисторов//Радиоэлектроника. – 1971. – Т.ХIII – IX.
 303. Мертинс В., Карнов Ю.С. Низкочастотные флуктуации напряжений в пленочных сопротивлениях//Известия вузов. Приборостроение. – 1996. – №5. – С.20 – 22.
 304. Токовые шумы толстопленочных резисторов/О.О. Бронзов, Т.П. Каминская, Е.А. Бессарабова и др.//Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. научн. – техн. семинара. Черноголовка, Моск. обл., 25 – 29 ноября 1991. – М.: ИТОРЭС. – 1993. – С.20 – 25.
 305. Алеференко Г.Д., Винец И.Л., Кристаллинский Л.П., Строкан И.В. Индивидуальное прогнозирование надежности терморезисторов по уровню нелинейности//Электронная техника. Сер.8. – 1979. – Вып.1(71).
 306. Геликман Б.Ю., Кристаллинский Л.П., Винец И.Л., Капитайкина Б.А. Результаты внедрения метода контроля качества по уровню нелинейности в производстве резисторов//Электронная техника. Сер.8. – 1975. – Вып.11(41).
 307. А.с. 362260 (СССР). Способ измерения нелинейности резисторов/Г.Б. Сердюк, Ю.И. Черевко, Н.И. Сегеда. – Оpubл. в Б.И., 1973, №2.
 308. Митряев Г.И., Острова С.О. Анализ методов измерения малых уровней нелинейности ВАХ двухполюсников//Устройства, элементы и методы комплексной микроминиатюризации РЭА: Межвузовский сборник. – Казань: КАИ. – 1980. – С.75 – 79.
 309. Сердюк Г.Б., Савчук Е.В. О применении методов идентификации для диагностирования непроволочных резисторов по переходным тепловым характеристикам//Электронная техника. Сер.8. – 1979. – Вып.1(71) – С.11 – 23.
 310. Геликман Б.Ю., Кристаллинский Л.П. Применение методов неразрушающего контроля качества при производстве резисторов и конденсаторов//Электронная техника. Сер.8. – 1973. – Вып.11.
 311. Рыжкова А.В., Ленина П.Ц., Шварц Н.А. Контроль соотношения контактной поверхности методом статистического определения сопротивления контактов//ТСС. Сер. ППС. – 1979. – Вып.5(38).
 312. Бережной А.В., Коломиец В.И., Светлаков В.И., Соболев В.В., Торопов Ю.А. Исследования причин перемежающихся отказов электромагнитных

- слаботочных реле//Физика отказов: Материалы III Всесоюзного совещания: –М.: Наука. – 1984.
313. А.с. 1229853 (СССР). Устройство для контроля качества контактов по его сопротивлению/Ю.В. Бекасов, М.Н. Звонов, В.П. Камышный и др. – Оpubл. в Б.И., 1986, №17.
 314. Светлаков В.И. Физическая модель отказов коммутационных устройств при наличии поверхностных пленок на контактах//Материалы Всесоюзной научно-технической конференции "Специальные коммутационные элементы". Тезисы докладов. – Под ред. И.Д. Ушакова. – Рязань: РТИ. – 1984.
 315. ОСТ 4.074.007-84. Реле слаботочные. Контроль неразрушающий. Осциллографический метод. – 1985.
 316. Поляков Г.А., Паречин В.И. Исследование акустических эффектов, возникающих при работе геркона//Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции СКЭ. – Рязань: РРТИ. – 1981. – С.62.
 317. Слепович И.А., Авгученко Г.Р., Поляков Г.А. Исследование динамики колебательных процессов при коммутации геркона//Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции СКЭ. – Рязань: РРТИ. – 1981. – С.60 – 61.
 318. Удалов В.Ф., Игнатов А.И. Фототеневой способ исследования колебаний контактных деталей в герконах с помощью луча лазера//Герметизированные магнитоуправляемые контакты. – Рязань: РРТИ. – 1976. – Вып.2. – С.97 – 102.
 319. Отработка методики и образцов аппаратуры для автоматизированной разбраковки герконов по акустическим информативным параметрам: Отчет по НИР (заключ.)//Рязанский радиотехн. ин – т (РРТИ). – тема 36 – 82; Руководитель работы А.Ф. Цветков: №ГР01820080968. – Рязань, 1984. – 99с.
 320. А.с. №1117722 (СССР). Способ контроля качества герметизированных магнитоуправляемых контактов/В.И. Паречин, Г.В. Авгученко, Г.А. Поляков. – Оpubл. в Б.И., 1984, №37.
 321. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио. – 1974. – 224с.
 322. Пестряков В.Б., Андреева В.В. Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА с использованием теории распознавания образов. Учебн пособие. – Куйбышев: КУАИ. – 1980. – 89с.
 323. Драйпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика. – 1973.
 324. Hu C. IC reliability simulation// IEEE Solid-State Circ. – 1992. – Vol.27, №3. – P.241 – 246.
 325. Hu C. The Berkley reliability simulator BERT: an IC reliability simulator// Microelectr. – 1992. – Vol.23, №2. – P.97 – 102.
 326. Roy Wheeler. Design for reliability reshapes designing//ED. – 1991. – №1. – P.121 – 132.

327. Чавчанидзе В.В., Кумишвили В.А. Об определении законов распределения на основе малого числа наблюдений// Применение вычислительной техники для автоматизации производства. – М.: Машгиз. – 1961. – С.129 – 139.
328. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. – М.: Мир. – 1974. – 406с.
329. Алексанян И.Т., Кривошапко В.М. Моделирование параметрических отказов и изучение надежности интегральных схем//Электронная техника. Сер.8. – Вып.4. – С.52 – 58.
330. Алексанян И.И., Кривошапко В.М., Муравьева Е.Н. Прогнозирование индивидуальной надежности лазеров методом машинных испытаний// Электронная техника. Сер.8. –1984. – Вып.4. – С.3 – 6.
331. Пестряков В.Б., Андреева В.В. Индивидуальное прогнозирование состояния РЭА методами экстраполяции: Учебн. пособие. – Куйбышев: КУАИ. – 1981. – 92с.
332. Субетто А.И. Качество как геополитическая стратегия возрождения и развития экономики и цивилизации России//Сертификация и управление качеством продукции: Тез. докл. междунар. НТК 13 – 15 октября 1999. – Брянск, 1999. – С.18 – 20.
333. Управление качеством электронных средств: Учебн. для вузов/О.П. Глуджин, А.И. Гуров, А.И. Коробов и др.; Под ред. О.П. Глуджина. – М.: Высш. шк. – 1994. – 414с.
334. Прохоренко В.А., Пролейко В.М. Управление надежностью//Электронная техника. Сер.8. – 1980. – Вып.8. – С.3 – 13.
335. Дубицкий Л.Г. Предвестники отказов в изделиях электронной техники. – М.: Радио и связь. – 1989. – 96с.
336. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА/Под ред. Л.Г. Дубицкого. – М.: Радио и связь. – 1983. – 232с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Радиоэлектронные средства в микроэлектронном исполнении	5
1.1. Уровни функционально-конструктивной сложности радиоэлектронных средств	5
1.2. Конструктивно технологические особенности микросборок с нерегулярной структурой	7
1.3. Микросборки с прецизионными элементами	9
1.4. Специфика космических РЭС	14
2. Качество микросборок и гибридных интегральных микросхем	17
2.1. Особенности создания специализированной МЭА	17
2.2. Проблемы обеспечения качества микросборок	19
2.3. Определение и показатели качества	25
3. Технология производства гибридных микросхем и микросборок	28
3.1. Технологические маршруты производства тонкопленочных ИМС	28
3.2. Технология производства толстопленочных ИМС и плат микросборок	36
3.3. Анализ и оптимизация технологических процессов	42
3.4. Аттестация технологических процессов по точности и стабильности	46
4. Анализ дефектов и отказов элементов и компонентов микросборок	51
4.1. Роль анализа дефектов и отказов в решении проблемы качества	51
4.2. Основные виды и причины отказов ИМС	53
4.3. Методология анализа дефектов	56
4.4. Алгоритмы анализа отказов	62
5. Обеспечение заданной точности изготовления микросборок и микроузлов	66
5.1. Проблемы обеспечения заданной точности	69
5.2. Классификация методов подгонки пленочных элементов	72
5.3. Функциональная подгонка ГИМС и МСБ	73
5.4. Пассивная подгонка резистивных элементов	77
5.5. Подгонка пленочных конденсаторов	81
6. Влияние материалов пленочных элементов на качество микросборок	84

6.1. Материаловедческие аспекты производства микросхем и микросборок	84
6.2. Особенности тонкопленочных элементов	86
6.3. Материалы, технология и электрические характеристики тонкопленочных резисторов	87
6.4. Материалы и электрофизические свойства тонких диэлектрических пленок и емкостных элементов	95
6.5. Материалы толстопленочных элементов	102
7. Контроль качества микросборок	124
7.1. Виды контроля качества	124
7.2. Пассивный контроль качества МСБ	125
7.3. Контроль паст и толстопленочных элементов микросборок	132
7.4. Диагностический неразрушающий контроль элементов и компонентов	146
8. Методы прогнозирования качества МСБ	170
8.1. Оптимальная оценка значения прогнозируемого параметра	170
8.2. Оптимальная классификация	171
8.3. Оценка значения прогнозируемого параметра с использованием регрессионной модели	176
8.4. Классификация по одному признаку	179
8.5. Оценка класса методом дискриминантных функций	183
8.6. Оценка класса методом потенциальных функций	186
8.7. Метод генерации прогнозных альтернатив	188
8.8. Прогнозирование долговечности методом нестационарных временных рядов	189
8.9. Отбраковка методом индивидуальной функции состояния	190
8.10. Метод машинных испытаний	192
8.11. Индивидуальное прогнозирование методами экстраполяции	193
9. Модели и системы управления качеством	196
9.1. Управление качеством	196
9.2. Системы управления	199
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	210
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	211

Учебное издание
Пиганов Михаил Николаевич
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КАЧЕСТВА МИКРОСБОРОК**

Учебное пособие

Редактор Л. Г. Гудкова
Техн. редактор Л. В. Лощенкова
Компьютерная верстка Е. А. Прокаев

Лицензия ЛР № 020301 от 30.12.96 г.

Сдано в набор 15.09.98.

Подписано в печать 11.07.99 г. Формат 60x84 1/16.
Бумага газетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,5.

Усл. кр.-отг. 13,6. Уч.-изд.л. 14,5.

Тираж 500 экз. *Заказ № 154.*

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королева.
443086 Самара, Московское шоссе, 34

ИПО Самарского государственного
аэрокосмического университета
443001, Самара, ул. Молодогвардейская, 151