

М.И. Горлов    Е.П. Николаева

**ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие



Воронеж 2002  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Воронежский государственный  
технический университет

М.И. Горлов

Е.П. Николаева

**ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Учебное пособие

Воронеж 2002

УДК 621.3.049

Горлов М.И., Николаева Е.П. Общие закономерности технологического процесса производства полупроводниковых изделий: Учеб. пособие. Воронеж: ВГТУ, 2002. 148 с.

Рассматриваются основные понятия качества и надежности полупроводниковых изделий (ППИ), требования к технологическому процессу для выпуска изделий высокой надежности, статистические методы управления качеством в производстве ППИ и технологические методы повышения надежности ППИ в процессе серийного производства.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальности 200100 “Микроэлектроника и твердотельная электроника”, при изучении дисциплины “Общие закономерности технологического процесса производства полупроводниковых приборов”.

Учебное пособие подготовлено на магнитном носителе в текстовом редакторе MS WORD 97.0 и содержится в файле «Производство.rag».

Табл. 12. Ил. 27. Библиогр.: 8 назв.

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (заведующий кафедрой д-р техн. наук  
Петров Б.К.)  
д-р техн. наук Е.Н. Бормонтов

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© Горлов М.И., Николаева Е.П., 2002

© Оформление. Воронежский  
государственный технический  
университет , 2002

## **1. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

На предприятиях электронной промышленности часто можно услышать следующие фразы: необходимо повысить качество и надежность выпускаемых изделий; качество выпускаемых нами изделий, как показала их эксплуатация в радиоаппаратуре, повысилось (или снизилось);

надежность выпускаемых нами изделий типа А (или серии Б) на входном контроле за истекший период повысилась (или понизилась).

На наш взгляд, в приведенных двух последних фразах смешаны понятия качества и надежности полупроводниковых изделий.

### **1.1. Качество изделий**

Еще в 1968 г. было выявлено более ста различных толкований понятия «качество продукции». В настоящее время наиболее распространена теория относительного качества, сущность которой состоит в том, что качество изделий определяется его целевым назначением.

По ГОСТ 15467-79 ("Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения") под качеством продукции (в нашем случае изделий) понимается *совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные требования в соответствии с назначением.*

Для изготовителя ППИ это понятие связано с соответствием выпускаемых изделий требованиям документации по электрическим параметрам и внешнему виду, принятием техническим контролем партии изделий с первого или второго предъявления, отсутствием или величиной претензий потребителей к данному типу изделий с входного контроля или из сферы изготовления электронных блоков и РЭА (рис. 1.1).

Потребители ППИ оценивают качество получаемых изделий по количеству отказов по электрическим параметрам и внешнему виду на входном контроле при нормальных условиях, повышенных или пониженных температурах, различных отбраковочных испытаниях.

По количеству отказов ППИ при изготовлении плат, блоков, РЭА также судят об их качестве.

Для изготовителей ППИ важнейшим показателем качества служит процент их выхода годных. Это объясняется тем, что выход годных изделий определяет в комплексе управляемость и стабильность производства, что, в свою очередь, связано с показателем надежности изделий.

Понятие о качестве составляется из точек зрения предприятия-изготовителя и предприятия-потребителя на основании понятий, бытующих в общественном мнении представлений о перспективах развития и использования изделий. Оно может содержать и истинные, и ложные, и эмоциональные, и рациональные составляющие. Ежедневно в обычных разговорах идет речь о качестве определенного изделия и связывается это понятие с некоторыми принципиальными и индивидуальными характеристиками изделия. Качество может быть признано вполне соответствующим назначению изделия, приемлемым или неприемлемым, делающим изделия надежными для использования в предназначенных целях, либо недостаточно надежными, либо ненадежными.

С позиций общественного мнения качество – это обеспечение потребностей, пожеланий потребителей. Изделие лучшего качества должно лучше удовлетворять потребности потребителей, больше нравиться им, несколько превосходить пожелания потребителей. "Высшее качество", "качество на повышенном уровне" – это показатели такого качества, нередко не столько оцениваемые количественными критериями, сколько эмоциональными, неколичественными.

С другой стороны, предприятиями-изготовителями изделий под качеством часто понимается точное следование техническому заданию. Например, если ИС выполняются в полной мере все требования технического задания, значит разработчик (конструктор) качественно разработал ИС, она полностью удовлетворяет требованиям по качеству. Если во время производства приходится выполнять много коррекций электрической схемы, конструкции, значит, ИС разработана некачественно.

При производстве хорошо разработанное изделие может быть некачественно, некорректно изготовлено, либо изготовлено из некачественных материалов, некачественным инструментом. Некачест-

венное изделие может быть обнаружено производственной системой контроля качества, либо не обнаружено или обнаружено, но пропущено ею.

Как видим, понятие качество в достаточной степени неопределенно, оно может рассматриваться с разных позиций, с учетом различных перспектив. С некоторых точек зрения качество всегда будет недостаточным, всегда могут быть сделаны замечания о необходимости совершенствования качества. Если качество не определено четкими, точными критериями, если оно определяется эмоциональным восприятием человеком отдельных характеристик изделий, оценки качества всегда будут приближенными. Критерии качества должны определяться количественно. Они должны исходить из предельных, но реальных возможностей производства, исходных материалов, конструкций. Только при таких количественных определениях возможно сопоставление качества и установление перспектив его повышения.

Требования к качеству ИС постоянно повышаются в связи с непрерывным ростом их степени интеграции и функциональной сложности, а также с расширением их производства. На этапе разработки качество конструкции ИС определяется ее технологичностью. Показатели качества по технологичности обычно связывают с процентом выхода годных ИС. Основную сложность при этом составляет то, что процент выхода годных является интегральной характеристикой качества, определяющей этапы и разработки, и производства. Применяя процент выхода годных непосредственно для оценки технологичности конструкции, можно существенно ошибиться, так как на его величину непосредственно влияет множество факторов, связанных с производством.

В рамках работ по повышению качества большинство изготовителей полупроводниковых изделий во всем мире с начала 1982 г. для измерения уровня качества продукции стали использовать такой показатель качества как количество дефектных изделий на 1 млн, оцениваемых статистически из всего количества изготавливаемых изделий данного типа. Например, в Японии качество ППИ должно удовлетворять следующим требованием: для дефектных полупроводниковых изделий количество

дефектных на миллион полученных не должно превышать 10, для интегральных схем малой и средней степени интеграции – 100, для больших ИС – 1000.

Для ППИ качество можно рассматривать как функцию процесса производства изделий независимо от времени. Процесс изготовления ППИ обычно сопровождается измерениями на разных этапах, используемыми для оценки обеспечения требуемого качества по операциям производственного процесса. Таким образом, качество связывается только с процессом производства изделий, но не со временем.

При оценке ППИ используются понятия, характеризующие запасы по тому или иному электрическому параметру по отношению к нормам технических условий. Запасы по параметрам определяются конструктивными данными и особенностями технологии производства, поэтому используют понятие конструктивно-технологического запаса.

Оценивать запасы по электрическим параметрам в виде размерных величин неудобно, так как в этом случае сравнение запасов по различным параметрам становится весьма затруднительным. Поэтому конструктивно-технологический запас  $K$  определяют как безразмерную величину. При отсутствии информации о законе распределения параметров предельные значения  $X_H$ ,  $X_B$  (нижнее и верхнее значения норм параметров) можно определять экспериментально на основе большой выборки. Выражения для коэффициента запаса для верхнего и нижнего значений норм будут иметь вид:

$$K_B = \frac{X_{B,TY} - X_B}{X_B - \bar{X}} \cdot 100\% ; \quad (1.1)$$

$$K_H = \frac{X_H - X_{H,TY}}{\bar{X} - X_H} \cdot 100\% , \quad (1.2)$$

где  $X_{H,TU}$  и  $X_{B,TU}$  – нижнее и верхнее значения норм, оговоренных в технических условиях;  $\bar{X}$  – среднее значение параметра в выборке.

Очевидно, что величина абсолютного значения производственного запаса по параметрам ( $X_{B,TU} - X_B$ ) или ( $X_H - X_{H,TU}$ ) должна быть не менее одной наибольшей погрешности измерений (контроля). При выполнении этого условия поставляемые ИС, даже при наличии вышеупомянутых погрешностей контроля, будут иметь значения параметров не хуже норм, установленных в технических условиях. Если производственный запас будет меньше погрешности измерений, то в этом случае могут браковаться даже ИС, имеющие параметры, соответствующие требованиям технических условий.

Результаты оценки запасов необходимо учитывать при установлении системы контроля параметров в технологической документации и технических условиях. При отсутствии запасов по какому-либо параметру возникает необходимость обязательной проверки данного параметра хотя бы на одной стадии технологического контроля.

Показатель "ритмичность выпуска товарной продукции" (далее "ритмичность выпуска изделий") характеризует в определенной степени и качество выпускаемых изделий. Общеизвестно, что при плохой организации производства качество выпускаемых изделий, как правило, снижается. При этом повышается процент брака при проверке изделий в ОТК и увеличивается уровень возврата изделий от потребителей. Как показали наблюдения, количество дефектов (нарушений технологического процесса) при неритмичной работе в конце месяца может возрасти в 3 – 5 раз по сравнению со средним значением.

Во многих фирмах США высшее руководство проповедует качество, вывешивает лозунги и всячески стимулирует борьбу за качество в течение первых 12 недель каждого квартала. Однако под давлением необходимости своевременного выполнения квартальных поставок или получения запланированной прибыли в последнюю неделю все может измениться.

Требования к качеству могут быть выполнены, перевыполнены, либо невыполнены. Невыполнение требований к качеству ведет к потерям, к понижению удовлетворенности потребителей продукции, оно должно быть предупреждено, его нельзя допускать. Вместе с тем, если перевыполнение требований по качеству ведет к избыточным затратам в производстве, его также не следует допускать, во всяком случае, когда это ведет к избыточным потерям. Данные о качестве являются важнейшим исходным материалом для конструкторов и технологов. Анализируя эти данные, они могут совершенствовать конструкцию, технологический процесс, то есть повышать качество этих изделий.

## **1.2. Надежность изделий**

Надежность – это внутреннее свойство изделия сохранять свою работоспособность в установленных нормах на параметры в зависимости от условий применения и длительности воздействия.

Если практически качество ППИ оценивается данными по входному и выходному контролю на соответствие их требованиям технических условий (ТУ) по электрическим параметрам и внешнему виду, то надежность ППИ связана с временным сохранением своих параметров в условиях эксплуатации, включая в это понятие и длительное хранение.

Используя указанные определения качества и надежности, можно оценивать качество и надежность ИС отдельно и независимо. Одна оценка – качество характеризует эффективность производственного процесса, другая – надежность является характеристикой свойств ИС во времени. Можно считать, что оба эти свойства зависимы, то есть качество определяет надежность или надежность определяет качество, но оба эти свойства, их оценки независимы.

Надежность ППИ характеризуется следующими показателями, как правило, записываемыми через конкретные величины в технические условия: сроком службы или долговечностью, сохраняемостью или гамма-процентным сроком сохраняемости; интенсивностью отказов.

Поэтому можно утверждать, что надежность изделия – более объективное понятие.

Если перед нами лежат две интегральные схемы одного типонаминала, то, замерив электрические параметры этих схем, можно сказать, какая из них более качественная. Это относится и к любым другим изделиям. Но априорно (т.е. заранее) мы не можем сказать, какая из этих схем будет более надежной. Как правило, характеристики надежности, зависящие от времени и режимов эксплуатации, носят вероятностный характер. Имея конкретный показатель надежности в технических условиях, например, интенсивность отказов  $\lambda$ , мы можем сказать с определенной вероятностью, что выпускаемая партия интегральных схем имеет данный показатель надежности, но конкретно для каждой схемы из этой партии мы не можем назвать характеристику надежности. Например, какая схема через какое время эксплуатации откажет, т.е. выйдет из строя, мы априорно не можем определить.

Отказы ППИ могут быть катастрофическими (чаще всего это случайные) и постепенными, связанными с деградацией параметров при внешнем воздействии, поэтому они иногда называются деградационными.

Имеющийся статистический материал по эксплуатации ППИ показывает, что доля катастрофических отказов в общем объеме отказов достаточно велика. Под внезапным, или катастрофическим, отказом понимается отказ, возникающий в результате скачкообразного изменения одного или нескольких значений основных параметров и выхода их за нормы ТУ.

Основное отличие внезапных отказов от постепенных заключается в том, что выход из строя при внезапных отказах не может быть прогнозируем (для ППИ, можно сказать, трудно прогнозируем), и в этом случае любые методы обычного контроля бесполезны, в то время как в случае постепенных отказов возможно включение в рабочий комплект измерительной аппаратуры так называемого встроенного контроля, позволяющего прогнозировать выход аппаратуры из строя по вине ППИ и проводить соответствующие мероприятия.

К катастрофическим отказам относятся отказы ИС, в которых, по крайней мере, одна из заданных тестовых комбинаций на входах не вызывает требуемого отклика на выходах. Для параметриче-

ских отказов характерно то, что реализуется вся полнота требуемых откликов на выходах, однако величины измеряемых параметров не попадают в диапазон установленных норм.

В серийном производстве ИС катастрофические отказы вызваны дефектностью производственного процесса, качеством применяемых материалов, шаблонов, энергоносителей, состоянием электровакуумной гигиены, уровнем культуры производства и т.п., а параметрические отказы в большинстве случаев – отклонениями режимов технологических операций и его разброса.

Параметрические отказы, сохраняя функциональную исправность СБИС, изменяют их быстродействие, потребление мощности и другие важные характеристики, без которых схемы не нужны потребителю. Эти дефекты часто бывают связаны со значительными нарушениями производственных процессов и обычно касаются больших количеств схем на пластинах, значительного количества пластин, партий СБИС. Катастрофические отказы обычно бывают связаны с локальными дефектами материалов, с включениями посторонних частиц в пластины или кристаллы, с неидеальностью производственного оборудования, с упущениями производственного персонала, поэтому их легче обнаружить.

Так как надежность любого изделия закладывается при его конструировании, а обеспечивается при его изготовлении, то надежность изготовленного изделия не может быть выше надежности, заложенной при конструировании. Это, на наш взгляд, может быть справедливо для механических изделий, но ни в коем случае ни для полупроводниковых, в том числе, конечно, и ИС.

Предположим, что надежность ИС после его изготовления  $P$  равна надежности схемы, заложенной при конструировании  $P_0$ . При этом всякое отклонение в технологическом процессе, в материалах, допусках, чаще всего встречающееся в начале серийного производства, снижает надежность получаемой ИС на величину  $\Delta P$ .

Но если в процессе серийного изготовления было внедрено новое конструктивно-технологическое решение, направленное на повышение качества и надежности изделия, проведена замена оборудования на новое с меньшими допусками или внедрена автоматизация технологическо-

го процесса и т.п., то надежность выпускаемых изделий может быть повышена на величину  $\Delta P$  относительно величины  $P_0$ . Тогда в общем случае для серийно выпускаемых ИС величина надежности  $P$  равна:

$$P = P_0 \mp \Delta P \quad (1.3)$$

Данное положение является основой для работы над повышением надежности ИС в процессе их серийного производства.

Например, что при начале производства СБИС обычно выход годных и надежность схем оказываются относительно небольшими, но они заметно повышаются при совершенствовании конструкции, устранении "слабых мест" конструкции, производственных процессов, выявленных при серийном производстве, и их стабилизации.

Задача производителей всеми возможными методами уменьшить время достижения надежности, заложенной при конструировании. Обычно требуется один – два года для того, чтобы довести производство ИС до уровня высоконадежного (рис. 1.2).

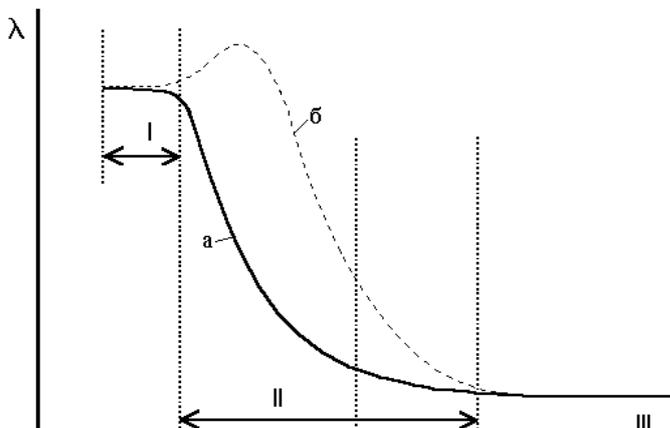


Рис. 1.2. Характерные изменения интенсивности отказов

на различных этапах их создания:

а – идеальный случай; б – реальный случай; I – разработка конструкции и технологии; II – освоение в опытном производстве; III – серийное производство

### **1.3. Конструктивно-технологические особенности ИС, влияющие на их надежность**

Современные технологические процессы изготовления ИС очень сложны. Анализ процессов показывает, что они проводятся при температурах, изменяющихся в диапазоне от  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (криогенное травление) до  $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  (окисление, диффузия, отжиг после ионной имплантации и др.), при давлении от атмосферного до  $10^{-7}$  мм рт. ст. Столь широкие диапазоны вызваны необходимостью про-

ведения с исходными материалами различных физических и химических процессов для получение структур ИС с удовлетворяемыми техническими характеристиками.

Повышенные требования к надежности современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) переносятся на изделия электронной техники и в первую очередь на ИС. Эти требования делают необходимым начинать работу по обеспечению надежности ИС с самого начала разработки – с выбора исходных материалов, структуры, конструкции, принципов построения производственного процесса. Работы по обеспечению надежности продолжаются и на стадиях изготовления, вплоть до финишного контроля, испытаний и на стадии эксплуатации путем статистического анализа результатов эксплуатации.

Например, надежность контактов и межконтактных соединений в ИС в равной мере определяется как искусством проектирования, так и правильностью изготовления. Конструктивные недоработки иногда можно исправить в процессе изготовления, но это ограничивает возможности для варьирования другими переменными в процессе изготовления, например контактов и межконтактных соединений; поэтому конструкцию целесообразно оптимизировать так, чтобы предоставить максимальную свободу для варьирования в технологическом процессе. Оптимизация конструкции и технологии невозможна без использования данных о надежности, поэтому можно говорить о взаимосвязанной совокупности трех факторов: проектирование, изготовление, надежность (рис. 1.3).

Рис. 1.3. Треугольник конструкция-технология-надежность – иллюстрирует взаимосвязь между процессом проектирования, изготовления и надежностью ИС

Повышенные требования к надежности современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) переносятся на изделия электронной техники и в первую очередь на ИС. Эти требования делают необходимым начинать работу по обеспечению надежности ИС с самого начала разработки – с выбора исходных материалов, структуры, конструкции, принципов построения производственного процесса. Работы по обеспечению надежности продолжаются и на стадиях изготовления, вплоть до финишного контроля, испытаний и на стадии эксплуатации путем статистического анализа результатов эксплуатации.

Например, надежность контактов и межконтактных соединений в ИС в равной мере определяется как искусством проектирования, так и правильностью изготовления. Конструктивные недоработки иногда можно исправить в процессе изготовления, но это ограничивает возможности для варьирования другими переменными в процессе изготовления, например контактов и межконтактных соединений; поэтому конструкцию целесообразно оптимизировать так, чтобы предоставить максимальную свободу для варьирования в технологическом процессе. Оптимизация конструкции и технологии невозможна без использования данных о надежности, поэтому можно говорить о взаимосвязанной совокупности трех факторов: проектирование, изготовление, надежность (рис. 1.3).

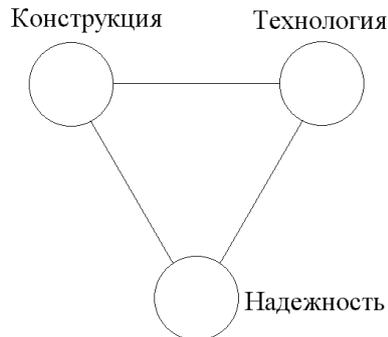


Рис. 1.3. Треугольник конструкция-технология-надежность – иллюстрирует взаимосвязь между процессом проектирования, изготовления и надежностью ИС

Быстрое развитие микроэлектроники, связанное в частности с повышением степени интеграции и уменьшением минимальных размеров элементов ИС, например, СБИС типа ДОЗУ (табл. 1.1), привело к усилению зависимости надежности схем от их конструктивно-технологических элементов (КТЭ).

В качестве примера КТЭ в ИС можно назвать алюминиевые и поликремневые шины, контактные узлы, защитный окисел, диффузионные области и т.п., а также зазоры между элементами схемы.

В середине 90-х произошло освоение производства СБИС с шириной элементов 0,5 мкм, а к 2010 г. предполагается освоить схемы с шириной линии 0,12 мкм, что близко к предельным физическим возможностям кремниевой технологии.

Вероятность дефектов, вызывающих отказ кристалла СБИС, с увеличением плотности расположения компонентов на кристалле увеличивается, особенно в ранний период изготовления новых ИС.

Интенсивность отказов пропорциональна корню квадратному из количества бит на кристалле. Если сложность кристаллов запоминающих устройств (ЗУ) возрастает каждые несколько лет в  $K$  раз, то надежность будет понижаться, интенсивность отказов будет увеличиваться в корень квадратный из  $K$  раз.

Уменьшение топологических норм приводит к значительному увеличению плотности размещения элементов на кристалле. Максимальное число транзисторов в современных СБИС равно  $10^6$  шт. К 2010 г. можно ожидать появления БИС с числом транзисторов 1 млрд, что также близко к предельным физическим возможностям полупроводниковой технологии. С увеличением плотности монтажа элементов возрастает потребляемая мощность схем, которая, по оценкам специалистов, к 2005 г. достигнет 100 Вт (против 30 Вт для современных самых мощных ИС).

Одна из главных причин отказов СБИС – загрязнение микрочастицами (до 80 % дефектов от общего количества дефектов). Природа такого вида загрязнений различна: оксиды металлов, оксид кремния, коллоиды, микроорганизмы и т.п. В табл. 1.2 показано, что даже специальные химикаты, выпускаемые химической промышленностью многих стран с этикеткой "для электроники", тем не менее, являются наиболее грязными среди прочих технологических сред по содержанию микрочастиц.



Таблица 1.2

Сравнительная чистота типичных технологических сред

по критерию содержания взвешенных частиц

Технологическая среда	Содержание частиц в 1 л
Воздух чистой комнаты класса "100"	1
Деионизованная вода (централизованная очистка)	10000
Деионизованная вода (финишная очистка)	300
Технологические газы	30 - 3000
Фоторезист	300
$\text{NH}_4\text{OH}$	300000
$\text{HCl}$	1000000
$\text{HF}$	2000000
$\text{H}_2\text{O}_2$	2500000
$\text{H}_2\text{SO}_4$	13000000

По требованию стандарта MIL-STD-209B (США) в 1 л воздуха в помещениях класса "100" должно содержаться не более 3,5 пылинок размером не менее 0,5 мкм. Размеры микрочастиц могут колебаться от 14 (человеческий волос) до 0,1 мкм (минимальные размеры бактерии) и менее. Они могут вызывать такие дефекты в литографических процессах, как проколы, ухудшение адгезии. Размеры дефектов от размеров частиц загрязнения будут различаться в зависимости от того, попала частица под слой резиста или поверх слоя. При попадании посторонних частиц под слой резиста существует некоторое пороговое значение частиц, при котором дефекты не образуются (на рис. 1.4 точка А кривой а). При этом критическая величина дефекта зависит от толщины слоя резиста и его типа.

Для выявления критического размера частиц в таком случае часто пользуются "правилом одной десятой", то есть размер частицы не должен превышать 0,1 от минимальной величины размера элемента схемы. Предполагается, что частицы такого размера адсорбируются на поверхности необратимо и для этого достаточно однократного контакта. В процессах окисления и термической обработки полупроводниковых пластин частицы вплавляются в рабочие слои и вызывают дефекты, повышающие проводимость и снижающие напряжение пробоя. При современном уровне технологии, когда средняя плотность дефектов порядка  $0,5 \text{ см}^{-2}/\text{слой}$ , выход годных снижается почти до нуля. Поэтому, чтобы получить выход годных СБИС хотя бы 10 % необходимо снизить плотность дефектов до  $0,05 \text{ см}^{-2}/\text{слой}$ .

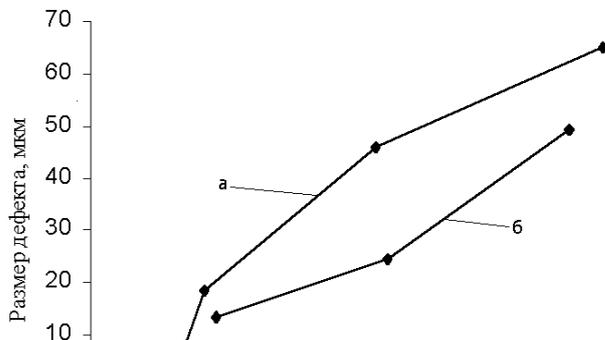


Рис.1.4 Зависимость размера дефекта от размера частиц  
на операции фотолитография:

а – для частиц, находящихся под слоем резиста;

б – для частиц, находящихся поверх слоя резиста

Контроль за количеством микрочастиц – важнейший фактор повышения эффективности производства СБИС, ибо адсорбированные частицы на поверхности чаще всего невозможно удалить. Например, частицы размером 0,1 мкм удерживаются на подложке с силой в 1000 раз большей, чем частицы с размером 1 мкм. Поэтому единственный способ не допустить загрязнения частицами – поддержание высокого уровня чистоты используемых в производстве технологических сред, материалов и оборудования.

Возрастают сложности технологического процесса по мере усложнения СБИС. Например, для производства динамического запоминающего устройства со случайным обращением емкостью

16 Кбит необходимо около 80 ступеней производственного процесса, а для производства кристалла такого же запоминающего устройства емкостью 16 Мбит нужно около 450 ступеней производственного процесса. Стоимостный фактор увеличивается соответственно увеличению сложности производственного процесса. Одна из возможностей удешевления производства связана с увеличением диаметра полупроводниковых пластин, на которых формируются кристаллы ИС.

В настоящее время идет процесс замены пластин диаметром 150 мм на пластины диаметром 200 мм, начинают рассматривать возможности увеличения диаметра пластин до 300 мм. Все это связано с крайне сложными техническими проблемами: с необходимостью обеспечения равномерного состава материала по всей толщине полупроводниковой пластины, с необходимостью обеспечения параллельности верхней и нижней поверхности кремниевой пластины, с необходимостью обеспечения отсутствия малейших деформаций пластин увеличенных размеров, с обеспечением равномерности обработки пластин повышенных диаметров и т.п. Несоблюдение хотя бы одного из указанных требований может заметно уменьшить выход годных кристаллов.

Конструкция ППИ и использование групповых методов обработки определяют необходимость особого подхода к проектированию процессов их изготовления.

Основные особенности такого подхода следующие:

неразрывность конструкции изделия и технологического процесса (ТП) его изготовления, то есть необходимость учета конструктивно-технологических особенностей при изготовлении изделия;

максимальное использование взаимной корреляции параметров элементов ППИ (на пластине, в партии пластин, в группе партий);

учет взаимосвязи между производственным браком (технологические потери) и отказами при эксплуатации, обусловленной единой природой дефектов, определяющих качество и надежность изделий.

Для учета конструктивно-технологических особенностей изделий необходимо решение следующих задач:

определение допусков на параметры физической структуры изделий, в том числе геометрические размеры элементов;

оптимизация минимальных размеров элементов и максимальных размеров кристалла изделия по показателям эффективности производственного процесса (на рис. 1.5 показано снижение минимальных размеров элементов, кристаллов и плотности дефектов по годам);

оптимизация параметров режимов технологических операций и технологического процесса в целом;

определение влияния эксплуатационных факторов и нагрузки на параметры, характеризующие надежность изделия;

обеспечение возможности управления отдельными операциями ТП и процесса в целом.

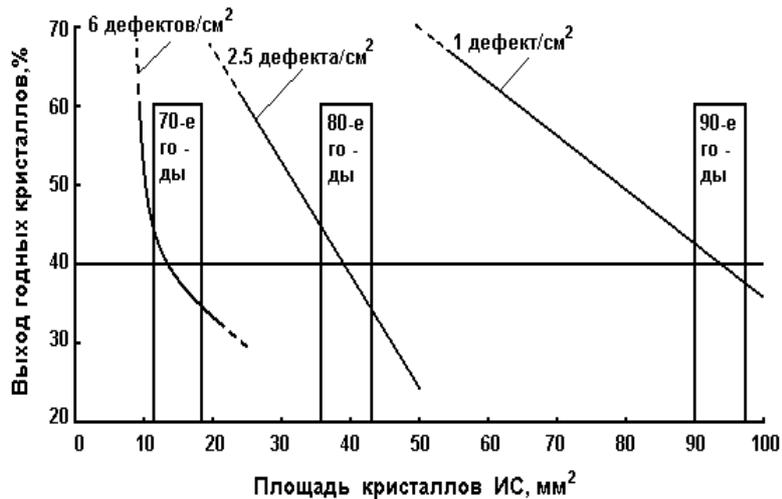


Рис. 1.5. Зависимость выхода годных кристаллов ИС от их размеров и плотности дефектов

Определение допусков на параметры физической структуры позволяет использовать их для обоснования норм показателей качества изделия при операционном контроле, для установления границ регулирования в системах статистического регулирования ТП, а также для определения режимов технологических операций, обеспечивающих создание функциональных элементов и изделия в целом с параметрами, лежащими в установленных пределах.

Технологические процессы изготовления изделий в большинстве своем непрерывно-дискретные.

Непрерывные технологические процессы не могут быть прерваны до их окончания. В случае их прерывания раньше окончания процесса в большинстве случаев изделие уходит в брак. Например, аварийное отключение печей при проведении диффузионных процессов практически приводит к браку всей партии пластин.

Дискретные технологические процессы разделяются на отдельные операции. Эти процессы можно останавливать на определенное для каждого процесса время и после некоторого перерыва продолжать далее. Последствия такого перерыва в ходе процесса практически не отражаются на качестве изготавливаемых изделий.

Технологический процесс изготовления полупроводниковых изделий также принадлежит к непрерывно-дискретному, так как состоит из двух самостоятельных непрерывно-дискретных процессов изготовления полупроводниковых кристаллов и их сборки. Изготовление кристалла полупроводникового изделия включает непрерывные и дискретные процессы химической обработки пластин, про-

цессы диффузии, литографии, напыления алюминия, разделения пластины на кристаллы. Каждый из этих процессов включает ряд технологических и контрольных операций (рис. 1.6).

Сложность технологических процессов и недостаточная подчас изученность их физико-химической природы, особые требования к исходным и обрабатываемым материалам, а также внешним условиям, в которых производится обработка пластин, приводят к тому, что воспроизводимость результатов техпроцесса не всегда может носить устойчивый характер. Все это вызывает появление скрытых дефектов, которые приводят к непостоянству выхода годных изделий. Поэтому технологический процесс производства изделий электронной техники требует введения необходимого количества контрольно-измерительных операций, на которых отделяются годные изделия от брака или от потенциально-ненадежных изделий.



## Контрольные вопросы

1. Качество изделий. Основные показатели, определяющие качество ППИ.
2. Конструктивно-технологические запасы ППИ по электрическим параметрам.
3. Надежность изделий. Катастрофические и параметрические отказы.
4. Три этапа жизненного цикла ППИ и надежность. Объясните положение  $P = P_0 \mp \Delta P$ .
5. Конструктивно-технологические особенности интегральных схем, влияющие на их надежность. Треугольник: конструкция – технология – надежность.
6. Зависимость размера дефекта от размера частиц на операции фотолитография.
7. Основные особенности подхода к проектированию процессов изготовления ИС. Зависимость выхода годных кристаллов ИС от их размеров и плотности дефектов.
8. Особенности технологического процесса изготовления ИС: непрерывно-дискретные, групповые.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ ПРОЦЕССУ ДЛЯ ВЫПУСКА ИЗДЕЛИЙ ВЫСОКОЙ НАДЕЖНОСТИ

### 2.1. Оценка технологического процесса

Высокая надежность ППИ обеспечивается не только правильным выбором хорошо отработанной конструкции, но и правильно организованным технологическим процессом (маршрутом).

Под технологическим маршрутом производства ИС понимается последовательность технологических и контрольных операций над исходной (входной) структурой (например, кремниевой пласти-

ной), приводящих к созданию требуемой выходной структуры (интегральной схемы), обладающей рабочими (эксплуатационными) характеристиками, лежащими в заданных диапазонах.

Технологическая операция – это законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте и на одной единице оборудования. В процессе обработки структуры на параметры каждой технологической операции и параметры структуры накладываются технологические ограничения или допуски.

Для полной реализации принципа соответствия фактических параметров требуемым допуски должны быть установлены на основные параметры используемых в процессе изготовления кристаллов материалов, реагентов, энергоносителей, производственных сред и помещений. Отсутствие технологических допусков даже на малую группу параметров делает технологический процесс производства ИС неконтролируемым и сильно зависимым от субъективных (опыта и добросовестности технологов и операторов) и случайных (погода, источники сырья и т.п.) факторов.

Технологический процесс изготовления кристаллов со структурой ИС состоит из многих операций: подготовки поверхности пластины, получения функциональных слоев, формирования их свойств и т.д. Количество операций в технологическом маршруте увеличивается с ростом степени интеграции ИС. При этом важное значение имеет учет физических процессов, положенных в основу технологических операций.

Основные операции технологических процессов производства структур ППИ на пластине осуществляются на основе групповой технологии, когда одновременно обрабатываются элементы всех структур на пластине или на нескольких пластинах, объединенных в партию.

Для групповых операций обобщающим показателем качества их проведения является распределение значений электрических параметров или оценок по внешнему виду у всех одновременно обрабатываемых элементов на пластинах в партии. Изменения в состоянии операции будут отражаться на свойствах этого распределения, и, в частности, на значениях его числовых характеристик, таких как математическое ожидание или среднее значение  $\bar{X}$  и среднеквадратическое отклонение или рассея-

ние  $\sigma$ . Таким образом, параметры  $\bar{X}$  и  $\sigma$  у разных партий могут различаться, отражая изменения качества проведения исследуемой операции.

Этими же параметрами можно охарактеризовать и прохождение партий после операций, выполняемых индивидуально для каждого изделия (например, приварка внутренних выводов, герметизация, классификация).

Производственный процесс имеет следствием изготовление партий изделий, характеристики которых подчиняются нормальному распределению, определяемому значениями  $\bar{X}$  и  $\sigma$  (рис. 2.1).

Пространство приемлемого качества (не обязательно равное диапазону, лежащему в пределах, оговоренных техническими условиями ТУ, но, возможно, более узкое, чем этот диапазон), представляет собой диапазон распределения, лежащий в рамках выборки, используемой для оценки надежности.

Например, при анализе толщины партии из 1000 кремниевых пластин было обнаружено следующее распределение толщин: от 0,587 до 0,613 мм – 100 %, от 0,591 до 0,609 мм – 99,8 %, от 0,594 до 0,606 мм – 95 % и от 0,597 до 0,603 мм – 50 %, при среднем размере 0,600 мм. Ширина и положение кривой распределения относительно нулевого значения оценивается специальными величинами: положение средней величины распределения относительно нуля, математическое ожидание, характеристика отклонения распределения от математического ожидания, то есть характеристика рассеяния (стандартное отклонение или сигма). Для нормального распределения (его еще называют распределением Гаусса) величины рассеяния

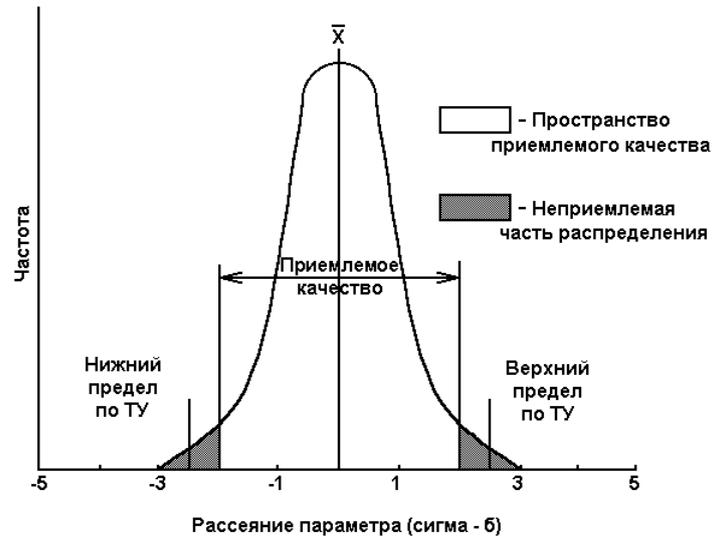


Рис. 2.1. Распределение, характеризующее производственный процесс

нормированы (рис. 2.2). Плюс-минус одна сигма укладывается в область, в которой размещается 68 % всех величин; плюс-минус две сигмы – 95 % всех величин и плюс-минус три сигмы – 99,73 % всех величин, рассеянных по закону нормального распределения.

Связь характеристик распределения (математического ожидания  $\bar{X}$ , стандартного отклонения  $\sigma$  и доверительной вероятности  $P_r$ ) с характеристиками процессов устанавливается при помощи индекса воспроизводимости  $C_p$  и коэффициента возможностей производства  $C_{pk}$ .

Вероятность того, что по результатам измерений выборки из  $n$  изделий стандартное отклонение  $\sigma$  попадет в интервал  $(a, b)$ , называется доверительной вероятностью  $P_r$ . Она определяется на основании распределения  $\chi$ -квадрат.

Величина  $C_p$  характеризует отношение величины допуска или величины рассеяния, допускаемого в производственном процессе к шести сигма, то есть к диапазону плюс-минус три сигма, в который при нормальном распределении укладывается 99,73 % всех величин.

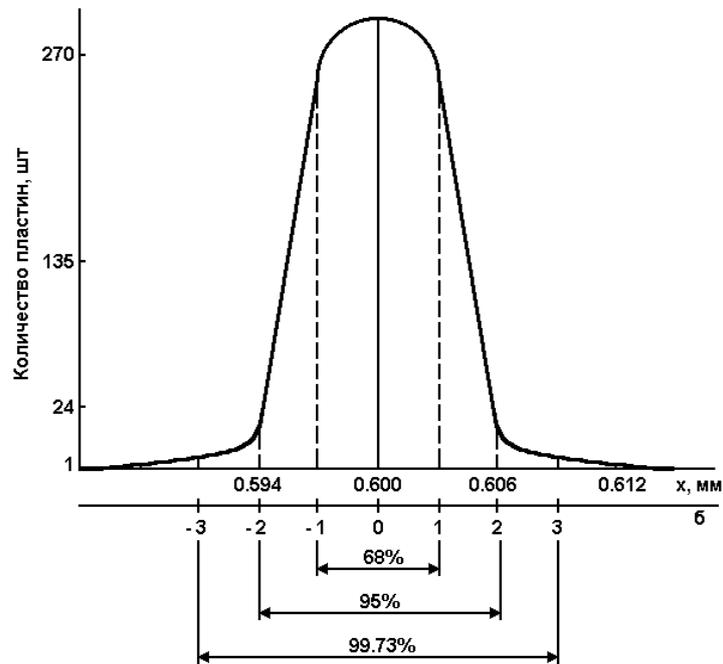


Рис. 2.2. Распределение по толщине пластин

Индекс воспроизводимости процесса  $C_p$ , связывающий вариации характеристик изделий и производственных процессов, обычно определяется формулой

$$C_p = \frac{X_B - X_H}{6\sigma}, \quad (2.1)$$

где  $X_B, X_H$  – верхнее и нижнее допустимые значения соответствующего параметра.

Принято, что процесс оценивается с помощью  $C_p$  следующим образом:

- а)  $C_p \geq 1,33$  – процесс вполне удовлетворителен;
- б)  $1,33 > C_p \geq 1,00$  – процесс адекватен;
- в)  $C_p < 1,00$  – процесс неадекватен.

Коэффициент возможностей производства  $C_{pk}$  связан с величиной  $C_p$  соотношением:

$$C_{pk} = C_p \left( 1 - \frac{2|\bar{X} - X_{ТУ}|}{\Delta} \right), \quad (2.2)$$

где  $\bar{X}, X_{ТУ}$  – среднее и предельное значение параметра по ТУ;  $\Delta$  – величина допуска.

Для процессов, в которых математическое ожидание значения контролируемой величины  $\bar{X}$  смещено относительно середины поля допуска, за коэффициент возможностей производства  $C_{pk}$  принимается

$$C_{pk} = \min \left\{ \frac{\bar{X} - X_H}{3\sigma}; \frac{X_B - \bar{X}}{3\sigma} \right\}, \quad (2.3)$$

Этот коэффициент учитывает точность настройки и стабильность процесса.

Максимальное значение величины  $C_{pk}$  равно величине  $C_p$ , так как оно будет максимальным, если среднее значение будет равно предельному по ТУ, то есть отклонение будет равно нулю, а значит и дробь будет равна нулю.

В тех случаях, когда выбранный по условиям допустимого процента брака, допуск будет больше, чем плюс-минус три сигмы, соответственно будет увеличиваться и критерий  $C_{pk}$ . Соотношение между уровнем допуска в величинах сигма, величиной  $C_{pk}$  и количеством бракованных изделий на миллион приведено в табл. 2.1.

Увеличение  $C_{pk}$  резко повышает качество изделий.

На практике понятие "качество" разработчики и производители ИС в значительной мере отождествляют с показателями технологичности и процента выхода годных. Логика при этом проста: хорошая технология есть хороший выход годных, высокая надежность. Конечно, технология, дающая высокий процент выхода годных, является необходимым условием высокой надежности, но отнюдь недостаточным. В практике любого производителя ППИ можно найти множество примеров, когда изделие с хорошим выходом годных страдает от проблем надежности. Коррозионные отказы ИС – яркий тому пример.

Таблица 2.1

Соотношение между уровнем допуска в величинах сигма, величиной  $C_{pk}$  и количеством бракованных изделий на миллион

Допуск в сигма	Величина $C_{pk}$	Число бракованных изделий на миллион
$\pm 3$	1,00	2700
$\pm 4$	1,33	64
$\pm 5$	1,67	0,6

±6	2,00	0,002
----	------	-------

Общий выход годных включает выход годных пластин после создания на них кристаллов со структурами, выход годных кристаллов с этих пластин и выход годных изделий на операции сборки. Наиболее нестабильным параметром является выход годных кристаллов, который может в несколько раз изменяться при переходе на новый тип БИС даже при полностью сохраняемом маршруте их изготовления. Причины снижения выхода годных – микро- и макродефекты. Условно разобьем пластину с годными кристаллами на две области. Первая область, не имеющая годных кристаллов и, как правило, представляющая собой краевую зону пластин, будет определяться как макродефект. Природа макродефектов: рассовмещение фотошаблонов, грязь на краевой области пластины, несоответствие одного из параметров функциональных слоев допустимым нормам и т.д.

На остальной части пластины годные кристаллы расположены не сплошной областью, а разделены неравномерно расположенными негодными кристаллами, работоспособность которых определяется микродефектами, приводящими к выходу из строя либо весь кристалл, либо его небольшую часть. Природа микродефектов – наличие микровключений, попадающих в процессе производства кристаллов БИС на пластину из воды, воздуха, химических реактивов, технологических газов и т.д.

Каждая технологическая операция оценивается уровнем технологических потерь. На конкретной операции этот уровень определяется процентом выхода годных схем или коэффициентом выхода годных. Последний более удобен в расчетах.

Коэффициент выхода годных на  $i$ -й операции равен

$$n_i = \frac{N_{ci}}{N_i}, \quad (2.4)$$

где  $N_{ei}$  – количество годных изделий на  $i$ -й операции;  $N_i$  – общее количество изделий, пришедших на  $i$ -ю операцию.

Уровень всего процесса изготовления ИС оценивают общим коэффициентом выхода годных

$$\eta = \prod_{i=1}^n \eta_i, \quad (2.5)$$

где  $n$  – число технологических операций.

Наибольшее влияние на технологические потери и, следовательно, на величину коэффициента выхода годных кристаллов оказывают два фактора: выход годных пластин  $\eta_{nl} = N(n)/N(0)$  после прохождения всего технологического процесса, состоящего из  $n$  операций (где  $N(0)$  – начальное количество пластин в партии,  $N(n)$  – количество пластин после прохождения всего маршрута из  $n$  операций), и выход годных кристаллов с пластины  $\eta_{кр}^{nl}$  (долей годных кристаллов на пластинах  $N(n)$ ), то есть

$$\eta_{кр} = \eta_{nl} \eta_{кр}^{nl} = \frac{N(n)}{N(0)} \frac{H(z)}{H}, \quad (2.6)$$

где  $H$  – общее количество кристаллов на пластине;  $H(z)$  – количество годных кристаллов на пластине.

Для серийной технологии производства кристаллов характерны значения:  $\eta_{nl} = 70 - 90 \%$  и  $\eta_{кр}^{nl} = 50 - 60 \%$ .

Величина  $\eta_{пл}$  связана с неправильной обработкой, ломкой и сильным загрязнением пластин в результате поломок (сбоев) оборудования, а величина  $\eta_{кр}^{пл}$  – с загрязнением частицами (появлением точечных дефектов) и выходом параметров структуры и операционных параметров за технологические допуски. Поэтому весьма опасно увеличение производственных ступеней, количества операций, производимых при изготовлении ИС.

Снижение уровня дефектности на пластинах позволяет существенно повысить выход годных схем памяти (в табл. 2.2 приведены данные по ИС ЗУ на 1 и 4 Кбит.

Таблица 2.2

Влияние дефектности на процент выхода годных

Изменение дефектности, крат	Дефектность, деф/см <sup>2</sup>	Число годных кристаллов на пластине, шт.	Процент выхода годных
Запоминающее устройство на 1 Кбит			
2	22	4	1,3
1,5	16,5	10	3,3
1,25	13,8	16	5,3
1	11	25	8,3
0,8	8,8	35	11
0,5	5,5	61	20
0,2	2,2	104	34
0,1	1,1	125	41

Запоминающее устройство на 4 Кбит			
2	22	0,03	0,01
1,5	16,5	0,25	0,08
1,25	13,8	0,74	0,24
1	11	2,15	0,7
0,8	8,8	5	1,6
0,5	5,5	18	6
0,2	2,2	64	21
0,1	1,1	98	32

Технологические факторы, обуславливающие появление на пластинах областей с низким выходом годных кристаллов ИС, могут быть различными. К ним относятся: отклонения толщины слоев оксида и поликристаллического кремния, отклонения сопротивления имплантированных слоев, погрешности размеров элементов при литографическом формировании топологии схемы, сформированной на предыдущих стадиях. Многие из этих факторов взаимосвязаны. Например, в области, где толщина слоя поликристаллического кремния меньше средней величины, глубина травления слишком высока, если время травления пластин выбрано, исходя из средней толщины слоя поликристаллического кремния. В областях с меньшей толщиной поликристаллического кремния затворы МОП-приборов обладают меньшими размерами. Это приводит к слишком малой длине канала МОП-транзистора, в результате чего транзисторы не отключаются при приложении соответствующего напряжения к электроду затвора. Поэтому может быть нарушено функционирование схем либо чрезмерно возрастут токи утечки.

На стадии производства стремятся достичь оптимального уровня выхода годных. Определение этого уровня позволяет наметить пути дальнейшего совершенствования производства. Наряду с оптимальным целесообразно определить достижимый при существующих технологических методах уровень, который указывает на возможный резерв повышения выхода годных без разработки принципиально новых технологических решений, а путем мелких усовершенствований силами специалистов предприятия, т.е. наиболее экономичным.

Забракованное на технологической операции изделие в литературе классифицируется как отказ по параметрам, который характеризует надежность технологического процесса. По функциональным признакам отказы технологического процесса условно можно разделить на три группы:

- отказы по оборудованию;

- отказы по организационным причинам;

- отказы по техническим причинам.

К причинам, вызывающим отказы первой группы, можно отнести:

- поломки деталей и узлов, разрегулирование механизмов и устройств, нестабильность параметров оборудования;

- появление дефектов и повреждений в оснастке, износ инструмента;

- неисправности контрольно-измерительной аппаратуры и др.

Причины, вызывающие отказы второй группы:

- недостаточный опыт и квалификация обслуживающего персонала;

- низкий уровень организации технического контроля качества изделий;

- отсутствие необходимых материалов, оснастки, заготовок, запасных частей;

- неритмичность работы и др.

Причины, вызывающие отказы по техническим причинам, следующие:

- низкое качество исходных материалов, их неоднородность;

недостаточная надежность методов входного, операционного и приемочного контроля изделий и материалов;

низкая точностная надежность технологического оборудования;

неправильно выбранные режимы исполнения технологических операций;

несоответствие помещений или рабочих мест требованиям "вакуумной гигиены" и др.

Под *надежностью технологического процесса* (ТП) предлагается понимать его способность обеспечивать выпуск продукции заданного качества с заданным ритмом в течение требуемого промежутка времени.

Практически надежность технологического процесса производства ППИ будем характеризовать двумя параметрами: управляемостью технологического процесса, который характеризуется параметром  $\eta$ , и стабильностью этого процесса, т.е. величиной  $\sigma(\eta)$ .

*Коэффициент управляемости* технологическим процессом  $K_y$  рассчитывается следующим образом:

$$K_y = \left( 1 - \frac{\eta - \bar{\eta}}{\Delta} \right) \cdot 100\% , \quad (2.7)$$

где  $\eta$  – установленный (плановый) процент выхода годных;  $\bar{\eta}$  – среднее значение процента выхода годных за определенный период времени (например, месяц) или по контролируемым партиям;  $\Delta$  – ширина поля допуска, устанавливаемая для данного процесса.

Для оценки стабильности технологического процесса по параметру  $X$ , необходимой при проведении аттестации процесса за определенный период времени, может быть использован показатель стабильности ТП, заданный выражением:

$$K_c = \left(1 - \frac{\sigma}{\Delta}\right) \cdot 100\%, \quad (2.8)$$

где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение величины  $X$  в партиях, изготовленных за период аттестации.

Управляемость и стабильность технологического процесса характеризуют его надежность за данный промежуток времени. Управляемость технологического процесса зависит от точности и воспроизводимости отдельных технологических операций.

Функционирование многооперационных технологических процессов производства ППИ сопровождается случайными возмущениями, выражающимися в отклонении показателей. Очевидно, чем позже на стадии производства обнаруживается отклонение этих показателей, тем к большим технологическим потерям это ведет.

Чтобы избежать этого, в управляемом технологическом процессе применяется активный метод контроля.

При изготовлении ППИ имеем дело с партиями ограниченного объема, поэтому для получения необходимой информации вводится стопроцентный контроль изделий на ряде основных операций, что дает возможность по абсолютным значениям параметров изделий судить об управляемости и стабильности ТП.

Активный метод контроля предполагает после выяснения причин отклонения процесса от оптимального обязательную обратную связь воздействия на технологический процесс в целях его регулирования или ликвидации нарушений. Поэтому наибольшую надежность обеспечивают регулируемые ТП, в которых имеется возможность обратного воздействия на них по результатам выходных испытаний. Технологический процесс необходимо осуществить так, чтобы исключить влияние оператора на надежность изготавливаемых изделий.

Практика показывает, что на тех операциях, на которых наблюдается большой процент брака, имеет место малая их надежность. Это объясняется тем, что ТП для данных операций не управляем или слабо управляем.

На рис.2.3 показано, влияние роста среднего значения процента выхода годных, т.е. управляемость ТП, и среднеквадратического отклонения процента выхода годных, т.е. стабильность этого процесса, на интенсивность отказов кремниевых ИС средней степени интеграции серии 106 (по годам).

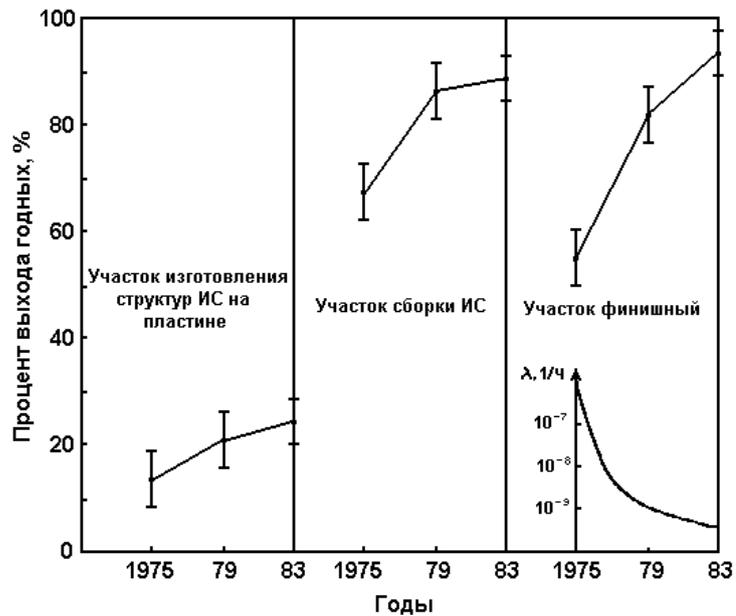


Рис. 2.3. Рост среднего значения и средноквадратического отклонения процента выхода годных ИС по годам

## 2.2. Применяемые показатели оценки технологической операции

Осуществление даже самой простой технологической операции связано с воздействием разнообразных факторов. Нельзя добиться значительного улучшения качества изделий, если изучать технологический процесс в целом. Поэтому первый этап анализа надежности технологического процесса состоит в разделении его на операции с последующей количественной оценкой их надежности.

ППИ окажется бракованной, если исполнитель допустил, например, ошибку при проведении операции термокомпрессии или на эту операцию были поданы плохо разбракованные сборки с кристаллами, имеющие загрязнения, царапины и т.п.

Пусть в  $i$ -й операции сборки одного изделия участвуют  $a$  одних деталей и  $b$  других деталей. Найдем вероятность того, что изделие после данной операции окажется бракованным. Это может быть в том случае, если бракованной была хотя бы одна из участвующих в сборке деталей или в процессе сборки была нарушена технология. Появление брака той или иной детали на операции сборки является независимым событием и, полагая, что общая вероятность брака на сборке будет мала, вероятность брака изделия после  $i$ -й операции сборки будет

$$W_i = aW_{ai} + bW_{bi} + W_{ci}, \quad (2.9)$$

где  $W_{ai}$ ,  $W_{bi}$  – вероятность попадания на сборку  $i$ -й операции бракованных деталей;  $W_{ci}$  – вероятность внесения брака в процессе операции.

Вероятность ошибки при сборке увеличивается с ростом числа операций, которые выполняются на одном рабочем месте. Во многих случаях вероятность внесения брака исполнителем в процессе проведения  $i$ -й технологической операции связана с числом рабочих циклов операции  $m$ , выполняемых на одном рабочем месте, квадратичной зависимостью:

$$W_i = 10^{-5} m^2. \quad (2.10)$$

Производственный интерес представляет *доля возврата*  $W_6$ , равная отношению числа возвращенных изделий (партий) к числу предъявленных на контроль изделий (партий). Доля возврата характеризует качество ТП и влияет как на уже завершившийся ТП, так и на последующий процесс изготовления. Предъявление изделий (партий) может быть как между отдельными операциями ТП, так и между различными технологическими процессами.

Если ввести следующие обозначения:  $d$  – дефектное,  $z$  – годное,  $n$  – принятое изделие,  $o$  – отбракованное изделие, то вероятность появления брака  $W_i$  и вероятность появления годных изделий  $P_i$ , полученных в результате данной  $i$ -й операции:

$$W_i = N_{di}/N_i; \quad (2.11)$$

$$P_i = N_{zi}/N_i, \quad (2.12)$$

где  $N_{zi}$ ,  $N_{di}$  – число годных и дефектных изделий после  $i$ -й операции;  $N_i$  – число всех изделий, прошедших на  $i$ -ю операцию.

Для оценки надежности технологических операций и процессов может использоваться группа показателей.

Основным параметром технологической операции является *доля дефектов*  $W$ , равная отношению числа дефектных изделий к числу изготовленных. Этот показатель определен как вероятность брака. Под *эффективностью контрольной операции*, понимается величина

$$\gamma = 1 - N_{d/n}/N_{z/n}, \quad (2.13)$$

где  $N_{z/n}$  – число годных принятых изделий;  $N_{d/n}$  – число дефектных принятых изделий.

При отсутствии на контрольной операции случаев, когда дефектные изделия могут ошибочно быть принятыми, значение  $\gamma = 1$ , то есть наивысшее значение эффективности контрольной операции равно единице.

*Коэффициент нечувствительности контроля*  $K_n$ , – это отношение отбракованных дефектных изделий после проведения контроля на данной операции к общему количеству изделий, отбракованных на этой операции по тем же параметрам-критериям, то есть

$$K_n = \frac{N_{d/o}}{N_{d/o} + N_{d/n}}, \quad (2.14)$$

где  $N_{d/o}$  – число дефектных отбракованных изделий.

При  $N_{d/n} = 0$  имеем  $K_n = 1$ .

Другими показателями процесса испытаний являются: *коэффициент скольжения дефектов*  $S$ , равный отношению числа необнаруженных дефектных изделий к числу фактически обнаруженных дефектных изделий, и *коэффициент резерва качества*  $r$ , равный отношению числа ошибочно отбракованных годных изделий к числу испытанных  $N$ , то есть:

$$S = N_{d/n}/N_{d/o}; \quad (2.15)$$

$$r = N_{z/o}/N, \quad (2.16)$$

где  $N_{z/o}$  – число годных отбракованных изделий.

При  $N_{d/n} = 0$  значение  $S = 0$ ; при  $N_{z/o} = 0$  значение  $r = 0$ .

Для технологических операций, включающих измерение электрических параметров, испытания на воздействие различных климатических и иных факторов, принят показатель – *коэффициент ошибочности контрольной операции*  $K_o$ , который приближенно равен отношению суммы не выявленных дефектных изделий и ошибочно забракованных годных к числу проверенных на этой операции изделий, то есть

$$K_o \approx \frac{N_{d/n} + N_{z/o}}{N} . \quad (2.17)$$

Более точно значение  $K_o$  вычисляется по формуле:

$$K_o = W \cdot (S - r) + r = S \cdot W + r \cdot (1 - W) . \quad (2.18)$$

При  $r = 0$ ,  $S = 0$  получим значение  $K_o = 0$ . На практике величина  $r$  оказывается пренебрежимо малой, поэтому  $K_o \approx S \cdot W$ . Графически указанные коэффициенты представлены на рис. 2.4.

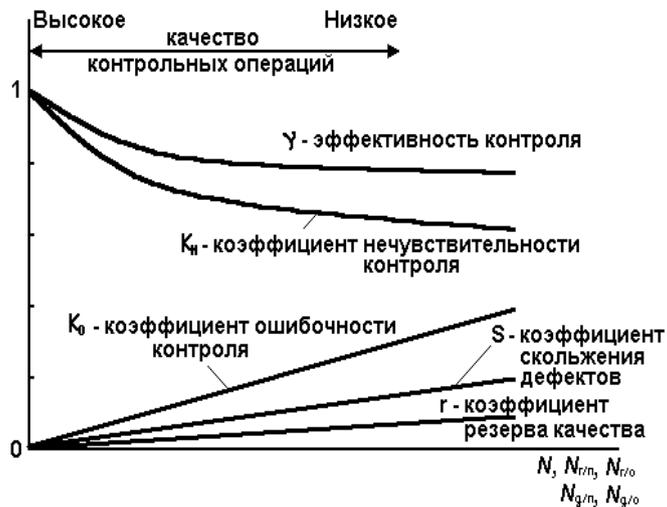


Рис.2.4. Возможные значения коэффициентов, характеризующих качество контрольных операций

Приведем пример подсчета показателей надежности технологической операции. При проведении первой классификации из партии БИС объемом 100 шт. забраковано 19 схем, в том числе 2 схемы забракованы необоснованно, а одна бракованная схема принята как годная, то есть  $N = 100$ ;  $N_o = 19$ ;  $N_{z/o} = 2$ ;  $N_{d/o} = 17$ ;  $N_{d/n} = 1$ .

Тогда  $N_{z/n} = (100 - 19 - 1) = 80$ ;

доля дефектов равна  $W = 19/100 = 0,19$ ;

эффективность контрольной операции  $\gamma = 1 - 1/80 = 1 - 0,0125 = 0,9875$ ;

коэффициент нечувствительности контроля  $K_n = 17/18 = 0,95$ ;

коэффициент скольжения дефектов  $S = 1/19 \approx 0,053$ ;

коэффициент резерва качества  $r = 2/100 = 0,02$ ;

коэффициент ошибочности контрольной операции  $K_o \approx (1 + 2)/100 = 0,03$ .

Найдем точное значение  $K_o$ :

$$K_o = 0,053 \cdot 0,19 + 0,02(1 - 0,19) = 0,0101 + 0,0162 = 0,0263 .$$

### 2.3. Надежность контрольных операций

В связи с большим числом технологических операций, сложностью процесса изготовления ППИ целесообразно проводить межоперационные контрольные операции. Нетрудно показать, что технологический процесс, при котором изделие неоднократно контролируется в процессе изготовления, надежнее в  $k$  раз (где  $k$  – число контрольных операций) процесса, в котором изделие контролируется только один раз.

В среднем на каждую контрольную операцию приходится  $m/k$  технологических операций при изготовлении изделия.

Вероятность пропуска брака на контрольной операции составляет

$$W_k \approx dm/k , \tag{2.19}$$

где  $d$  – коэффициент, характеризующий сложность контроля, при этом  $0 < d \leq 1$ .

Предположим, что вероятности пропуска брака на отдельных операциях будут равны  $W_1 = W_2 = \dots = W_i$ . Тогда вероятность брака схемы после изготовления на  $m/k$  операциях

$$W^{(1)} = 1 - (1 - W_i)^{m/k}, \quad (2.20)$$

а вероятность брака после первой контрольной операции

$$W_{1k} = W^{(1)}W_k = (dm/k)[1 - (1 - W_i)^{m/k}]. \quad (2.21)$$

После проверки на последнем контрольном участке надежность выпущенного изделия будет равна

$$P = 1 - W_{nk} = 1 - (dm/k)[1 - (1 - W_i)^{m/k}]^k. \quad (2.22)$$

Предполагая достаточно высокую надежность контрольных операций, получим приближенную формулу:

$$P \approx 1 - dm[1 - (1 - W_i)^{m/k}] \approx 1 - (dm^2W_i)/k. \quad (2.23)$$

Тогда вероятность брака готового изделия равна

$$W \approx (dm^2W_i)/k. \quad (2.24)$$

Из полученной формулы видно, что вероятность брака готового изделия прямо пропорциональна вероятности пропуска брака на отдельных операциях, квадрату числа технологических операций и обратно пропорциональна числу контрольных операций.

Успех контроля производства характеризуется показателем качества – долей дефектных изделий (ДДИ) в общем выпуске. ДДИ зависит от многих факторов и, в частности, от контроля бездефектно-

сти изделий. Повторный контроль позволяет снизить ДДИ, так как дефектные изделия, ошибочно пропущенные при первом контроле, могут быть выявлены при последующих проверках. Ограничением для числа проверок являются затраты на их проведение.

Ошибки контроля могут быть двух типов: отбраковка годных изделий и пропуск дефектных. Отбраковка годных изделий мало влияет на качество выпуска этой партии, но уменьшает объем партии и снижает произведенную стоимость. Предположим, что на выходной контроль после изготовления поступило  $N$  изделий, из которых часть изделий будет принята, другая часть – забракована.

В общем случае

$$N = N_{z/n} + N_{\partial/n} + N_{\partial/o} + N_{z/o}, \quad (2.25)$$

где  $N_{z/n}$  – количество годных принятых изделий;  $N_{\partial/n}$  – количество дефектных принятых изделий из-за некачественного выходного контроля;  $N_{\partial/o}$  – количество дефектных отклоненных изделий;  $N_{z/o}$  – количество годных отклоненных изделий из-за некачественного выходного контроля.

Тогда надежность производства будет равна вероятности того, что изделие, принятое при выходном контроле, окажется годным:

$$P = \frac{N_{z/n}}{N_{\partial/n} + N_{z/n}}. \quad (2.26)$$

Затраты на контрольные операции ИС достигают 25 – 50 % от себестоимости продукции, причем с ростом качества и надежности изделий эта доля возрастает.

Примем, что надежность полупроводниковых изделий, обеспечиваемая производством, зависит от:

надежности исходных деталей ( $P_1$ ), то есть вероятности того, что на сборку поступают качественные детали;

надежности получения структуры изделия на пластине ( $P_2$ );

надежности процесса сборки изделия в корпус ( $P_3$ );

обеспечения отбраковки потенциально ненадежных изделий технологическими методами испытаний ( $P_4$ );

выходного контроля, определяемого вероятностью того, что предъявляемое изделие действительно полностью соответствует требованиям технических условий ( $P_5$ ).

Требование к надежности сборочных процессов, к надежности отбраковочных испытаний и выходного контроля заключается прежде всего в том, чтобы сохранить полученную первоначально надежность структур изделий на кристалле, а не ухудшить ее за счет малой надежности сборочных, отбраковочных и контрольных процессов.

Выразим величины  $N_{z/n}$  и  $N_{\partial/n}$  через  $N$ , надежность технологического процесса и контрольных операций:

$$N_{z/n} = N \cdot P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5; \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} N_{\partial/n} &= N \cdot W_5(W_1 + P_1 \cdot W_3 + W_2 + P_2 \cdot W_3 + W_3 + P_3 \cdot W_4) = \\ &= N(1 - P_5)(3 - P_1 \cdot P_3 - P_2 \cdot P_3 - P_3 \cdot P_4), \end{aligned} \quad (2.28)$$

тогда

$$P = \frac{P_1 P_2 P_3 P_4 P_5}{P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 + (-P_5)(-P_1 P_3 - P_2 P_3 - P_3 P_4)} \quad (2.29)$$

Учитывая, что знаменатель при больших значениях вероятностей будет стремиться к 1, получим

$$P \approx P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 . \quad (2.30)$$

Данная формула относится к полным отказам изделий в процессе производства.

#### **2.4. Управляемость и стабильность технологического процесса**

Надежность ППИ зависит от того, насколько управляем технологический процесс их изготовления, что в свою очередь связано с воспроизводимостью выполнения отдельных технологических операций в непрерывном технологическом процессе.

Управляемость технологического процесса прежде всего предусматривает невозможность попадания в производственный процесс случайных включений, пропуска или небрежного выполнения отдельных операций.

Управляемость техпроцессом становится более целенаправленной, если известна зависимость значений выходного параметра годной схемы от их значений на отдельных операциях.

Наблюдения показали, что малые отклонения от оптимального технологического процесса могут привести в процессе производства и при длительном хранении к существенным изменениям значений выходных электрических параметров.

Чтобы избежать этого, в управляемом технологическом процессе применяется активный метод контроля.

При активном методе контроля технологического процесса получают ответы на следующие основные вопросы:

правильно ли идет технологический процесс или есть отступления, каковы причины нарушения технологического процесса;

выдерживается ли процент выхода годных изделий на данной операции и величина его разброса;

в каком интервале допуска находятся измеряемые параметры изделия; какова кривая распределения параметров изделий после данной операций и др.

Положения, на которых основан метод активного контроля, сводятся к тому, что при производстве ППИ имеет место повторяемость технологического процесса. На технологический процесс могут воздействовать различные факторы, число которых достаточно велико и степень влияния их носит различный характер, в том числе и случайный. В зависимости от характера процесса производства эти случайные величины могут иметь некоторую определенную тенденцию и носить чисто случайный или равновероятный характер. Воздействие тех или иных факторов на технологический процесс подчиняется *закону больших чисел*, который гласит, *что малые отклонения от среднего значения более вероятны, чем большие отклонения, и вероятность резких скачков параметров изделий ничтожно мала*. Но эта теория, подходящая к технологическому процессу получения механических деталей, сборки узлов, машин, оказалась неверной по отношению к полупроводниковым изделиям. В результате единого технологического процесса в партии получаются как годные, так и бракованные по электропараметрам и катастрофическим дефектам изделия.

В основе активного метода контроля лежит анализ кривых распределения параметров структур на пластине, или параметров, характеризующих технологическую операцию, или параметров полупроводниковых изделий в партии и определение по ним факторов, влияющих на ход производства.

При производстве ППИ для увеличения количества информации используются взаимные связи, имеющие место в технологических процессах. Это могут быть связи между видом брака на первой классификации и отказами при электротермотренировке, поведением проводниковых изделий при повышенной температуре и качеством напайки кристалла, процентом выхода годных и надежностью при эксплуатации и др.

В любом конкретном производстве технологи изучают эти связи и используют их для целей контроля. В соответствии с наличием критических взаимных связей выбирается комплексный параметр

(параметры) для целей контроля одной технологической операции или групп технологических операций и в целом технологического процесса.

При проведении статистического активного контроля регулирование технологического процесса может проходить двумя путями:

1. Выявление дефектов производства после окончания производственного процесса. Результаты контроля могут быть использованы для коррекции вновь организуемого процесса или вновь запускаемых партий. Здесь точность коррекции будет зависеть от точности определения количественных характеристик. Время, необходимое на контроль и коррекцию ТП, не играет роли.

2. При проведении контроля технологический процесс продолжается. В этом случае время контроля будет связано со скоростью изменения параметров технологического процесса. Такой контроль носит название предупредительного статистического контроля, т.е. предполагается известной скорость изменения технологического процесса и в соответствии с этим устанавливаются допустимые границы контролируемых параметров.

Вопрос организации правильного управляемого процесса зависит от конкретных условий производства. Поэтому ниже приведены лишь общие рекомендации:

при контроле ТП нет второстепенных факторов;

повышение культуры производства и моральной ответственности – залог стабилизации технологического процесса;

исключение попадания каких-либо посторонних частиц при сборке;

управление технологическим процессом необходимо начинать с процессов, определяющих подготовку производства;

возможность периодической проверки любого параметра технологического процесса;

однозначность воздействия результатов контроля на технологический процесс;

технологический процесс должен протекать с наименьшим участием человека.

Активный метод контроля технологии предусматривает разработку и внедрение автоматической системы управления технологическими процессами (АСУТП) как отдельных технологических операций, так и групп однотипных операций на базе ЭВМ.

В свою очередь АСУТП для изготовления структур ИС на пластинах требует разработки и внедрения специальных тестовых структур на пластине для замера физических параметров технологических операций.

Одной из особенностей технологического процесса полупроводникового производства является его вариантность. Например, нанесение пленок фоторезистора можно проводить распылением и центрифугированием; разделение пластин на кристаллы – резкой алмазными дисками, полотнами, проволокой, абразивными кругами, скрайбированием, при помощи ультразвука, лазера; приварка внутренних выводов – ультразвуковой, термокомпрессионной или термозвуковой сваркой и т.д.

Для выбора технологического процесса из всех вариантов необходимо выбрать один, который бы соответствовал критерию прогрессивности.

Критерием прогрессивности любого технологического процесса наряду с улучшением параметров и характеристик самого изделия является высокая экономическая эффективность, определяемая рядом частных взаимосвязанных критериев, обеспечивающих возможность создания автоматизированного высокопроизводительного оборудования с длительным сроком эксплуатации.

Наиболее важными условиями, определяющими критерии прогрессивности, являются:

1. Универсальность, т.е. возможность проведения подавляющего большинства операций производственного цикла с помощью идентичных технологических приемов.

2. Непрерывность, являющаяся предпосылкой для последующего объединения целого ряда технологических операций производственного цикла в сочетании с одновременной групповой обработкой изделий.

3. Высокая скорость проведения основных операций технологического процесса или же возможность их интенсификации (например, в результате светового воздействия, лазерного и ультразвукового излучения и др.).

4. Воспроизводимость параметров на каждой операции и высокий процент выхода годных изделий.

5. Технологичность конструкции изделия, отвечающая требованиям автоматизированного производства (возможности автоматизированной загрузки, базирования, монтажа, сборки и т.п.).

6. Формализация, т.е. возможность составления на основе аналитических зависимостей параметров изделия от параметров технологического процесса математического описания (алгоритма) каждой технологической операции и последующего управления всем технологическим процессом с помощью ЭВМ.

7. Адаптивность (жизненность) процесса, т.е. его конкурентоспособность в условиях непрерывного появления новых процессов и возможность перестраивания оборудования для изготовления новых видов изделий без существенных капитальных затрат.

Большинству из перечисленных критериев прогрессивности технологического процесса удовлетворяют процессы, основанные на использовании электронных и ионных явлений, происходящих в вакууме и разряженных газах:

ионное легирование полупроводниковых пластин различными примесями с регулированием в широких пределах концентрации примесей и глубины легирования;

ионное распыление металлов, диэлектриков и полупроводников с целью получения пленок различной толщины и состава, межсоединений, емкостных структур, межслойной изоляции, межслойной разводки;

ионное травление кремния и его соединений, металлов, сплавов и диэлектриков;

плазменное анодирование поверхности кремниевых пластин и пленок металлов с целью получения оксидных пленок;

электронно-лучевое экспонирование и плазменное удаление фоторезиста;  
полимеризация органических изоляционных пленок в результате облучения их электронами.

Возможность унификации, а затем и стандартизации можно считать необходимым условием оптимальности отдельной технологической операции или всего процесса изготовления ИС в целом.

Необходимым условием воспроизводимости ИС и особенно СБИС является организация работы в чистой комнате. В этих комнатах поддерживаются заданные температура и влажность воздушной атмосферы с точностью регулирования  $\pm 2^\circ\text{C}$  и  $\pm 1\%$  соответственно и запыленность не более 50 частиц размером 1.0 мкм в 1л воздуха, при этом содержание частиц размером 0,5 – 1 мкм в несколько раз выше. В рабочих размерах боксов поддерживается запыленность не выше 5 частиц размером 0,5 – 1 мкм в 1л воздуха (рис. 2.5).

Технологические процессы характеризуются зависимыми и независимыми рабочими параметрами. Чем более управляемый и стабильный технологический процесс, тем выше гарантия получения высокого качества и надежности выпускаемых ППИ. При разработке систем автоматического технологического оборудования обычно стремятся к тому, чтобы как можно большее количество переменных параметров управлялось автоматически.

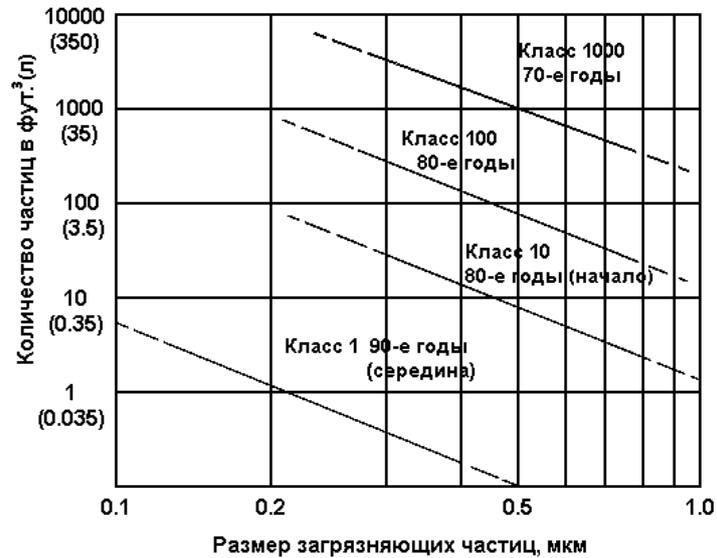


Рис. 2.5. Размеры и концентрация частиц по классам чистых комнат

Практически невозможно оператору управлять вручную всеми переменными параметрами, как и невозможна полная автоматизация всего производства. Поэтому часто достигается компромисс между количеством переменных параметров, управление которыми предусматривается при проектирова-

нии оборудования вручную. В табл. 2.3 представлены данные по повышению управляемости технологического процесса за счет внедрения автоматизации.

Анализ результатов электротермотренировки (ЭТТ) показывает, если более 50 % отказов являются катастрофическими, то это говорит о неуправляемости и нестабильности технологического процесса. При стабильном технологическом процессе изготовления ИС, когда количество отказов на ЭТТ менее одного процента, анализ результатов испытаний показывает, что более 90 % отказов ИС происходит из-за ухода их электрических параметров за нормы, установленные в ТУ.

Таблица 2.3

Распределение по видам брака при обычном и автоматизированном производстве

Обычное производство (1981 г.)		Влияние автоматизации	Автоматизированное производство (1984 г.)	
Причины брака	Брак, %		Причины брака	Брак, %
Дефекты в пластинах из-за ошибок в технологическом процессе, излишних переделок, размещений (в шаблонах)	20	Снижение не-стабильности технологического процесса	Дефекты в пластинах	5

Ошибки при контрольных измерениях	10	Улучшение контактирования в испытательном устройстве. Более совершенная аппаратура контроля с программным управлением	Ошибки при контрольных измерениях	6
Дефекты в монокристаллическом кремнии	12	Совершенствование контроля	Дефекты в монокристаллическом кремнии	8
Дефекты в поликристаллическом кремнии		Совершенствование технологических процессов	Дефекты в поликристаллическом кремнии	12
Дефекты в контактах	12	Использование новых проводящих материалов	Дефекты в контактах	12

Окончание табл. 2.3

Обычное производство		Автоматизированное
----------------------	--	--------------------

(1981 г.)		Влияние автоматизации	производство (1984 г.)	
Причины брака	Брак, %		Причины брака	Брак, %
Дефекты, возникающие при перемещении пластин вручную из-за пыли, загрязнения, переделок	24	Автоматическое перемещение деталей. Достижение высокого класса чистоты производственных помещений	Дефекты, возникающие при перемещении пластин	5
Дефекты шаблонов	10	Контроль шаблонов и исправление	Дефекты шаблонов и несоблюдение норм проектирования	5
		Появление новых видов брака	Неисправности автоматического оборудования	9
Суммарный процент брака	83			55
Выход годных	17			45

## **2.5. Организационно-технические мероприятия по обеспечению заданной надежности при производстве изделий**

Нет пределов повышения качества и надежности изделий, поэтому действуют регулярной системой разработки и реализации программ обеспечения качества и надежности в процессе серийного производства.

Анализ пооперационного процента выхода годных ИС, изучение механизмов отказов на каждой технологической операции и на основании этого принятие мер по устранению "слабых" мест позволяют проводить оптимизацию параметров технологических режимов, находить связь между деградацией по конкретному механизму отказа и технологическим фактором. Полученная таким образом связь между конкретными механизмами отказов и технологическими факторами позволяет контролировать стабильность технологического процесса.

Разработка оптимального технологического процесса рассматривается как многоступенчатая (в первую очередь во времени, связанная со знаниями и возможностями в данный период времени) процедура принятия решений (разработка мероприятий), в результате которой определяются наилучшие на данный момент совокупность, содержание и последовательность технологических операций. Это, в свою очередь, и обуславливает процесс непрерывного повышения качества ИС.

Степень внедрения и эффективность корректирующих мероприятий зависят от квалификации персонала, от уровня механизации и автоматизации технологического процесса.

Необходимо иметь в виду, что в работе по повышению надежности процесса производства нет второстепенных факторов – высокая надежность зависит от всего их комплекса.

Например, строго выполняя установленный технологический процесс, необходимо также проводить мероприятия, направленные на повышение чистоты и культуры производства. На рабочем месте

не должно быть ничего лишнего, а также должна быть исключена возможность попадания случайных деталей, компонентов, неучтенных деталей и т.д.

Выполнение приведенных выше и других подобных мероприятий должно проводиться не от случая к случаю, а методически, повседневно и настойчиво.

Технологу, как никому другому, известно, что как бы ни хорошо отработаны схема, топология и конструкция изделия, но если производство не налажено, высокой надежности выпускаемых ППИ получить не удастся. Технологический процесс производства для обеспечения надежности должен быть управляем на всех его этапах, технолог должен знать, что он получит в результате данного технологического процесса и с какой точностью.

Первым этапом управления технологическим процессом является получение воспроизводимости процесса с тем или иным разбросом. Любой входной и выходной параметр, элементы топологии и конструкции обязательно должны иметь две границы допуска, даже если, на первый взгляд, кажется, что вторая граница не имеет значения; все параметры должны быть известны "от – до", а не "менее" или "более".

Следовательно, начальной работой является установление допустимых значений на все без исключения параметры, компоненты, затем определение устойчивости выходных данных собираемого изделия по замерам, статистическим исследованиям и т.п. Это необходимо для обеспечения стабильности заданного технологического процесса. При колебаниях параметров исходных материалов корректировку технологического процесса не следует производить до тех пор, пока не ясна физическая сущность явления.

Обеспечение управления технологическим процессом начинается с процессов, определяющих подготовку производства; последняя оказывает существенное влияние на надежность выпускаемой продукции.

Практика организации технологических процессов показывает, что те процессы, которые не проверяются с течением времени, становятся ненадежными.

Все детали, устройства и операции без исключения проверить нельзя, но и 100 %-ный контроль еще не обеспечивает высокую надежность. На опыте контроля продукции человеком показано, что эффективность контроля изделий людьми составляет только 87 %. Если допустить трехкратный 100 %-ный контроль, то в этом случае эффективность контроля составит около 95 %. При контроле необходимо учитывать надежность контрольно-измерительной аппаратуры, а ее надежность может быть соизмерима с надежностью выпускаемых изделий, исследуемых техпроцессов и т.п. Таким образом, с увеличением числа контролируемых параметров изделий растет вероятность ошибки при измерении. При контроле необходимо учитывать надежность методики контроля. Надежность методики контроля существенно зависит от характера технологических процессов, которые подвергаются контролю, от физической сущности и взаимной связи отдельных составляющих техпроцессов и ряда других причин.

Ошибка при контроле, а следовательно, и надежность контроля существенно зависят от того, как производится контроль: автоматически или оператором. В последнем случае, начиная с некоторого момента времени, возможность ошибки оператора значительно возрастает. Этот момент времени зависит от многих причин: состояния здоровья, предыдущей нагрузки, тренированности и т.п. – и может изменяться в десятки раз. Следовательно, общим правилом будет условие уменьшения, насколько это возможно, времени, затрачиваемого оператором на контроль, т.е. применение выборочных испытаний. Теоретические исследования показывают, что, начиная с некоторого количества изделий, выборочный контроль обладает большей надежностью, чем сплошной.

Основные требования к контролю следующие: контроль должен быть активным, так как по результатам контроля должна иметься возможность суждения о состоянии технологического процесса и выявления факторов, влияющих на технологический процесс. Результаты контроля должны выдаваться в форме, удобной для быстрого восприятия и воздействия на контролируемый процесс.

Применение контрольно-измерительной аппаратуры, отвечающей на вопрос "годен – не годен", с целью повышения надежности производства нерационально. Такая аппаратура не позволяет управлять технологическим процессом.

Обеспечение высоконадежного производства предусматривает организацию широкой информации о поведении выпускаемых изделий в условиях эксплуатации. Создание высококвалифицированной группы по изучению опыта эксплуатации, рекламаций и информации по надежности, а также проведение своих контрольных опытов по проверке надежности технологических процессов – все это конкретные мероприятия по повышению надежности производственных процессов.

Не способствует повышению надежности изделий существующее мнение, что проблема надежности может быть решена только путем создания подобных групп и что надежность – чисто математическая проблема.

Надежность сборочных процессов зависит от их организации. Работа в этом направлении может дать существенный выигрыш, результаты которого проявятся достаточно быстро. Задача сводится к нахождению оптимального варианта соотношения между количеством операций на каждом рабочем месте и числом рабочих мест при заданной общей надежности изделия.

Для оценки необходим критерий, позволяющий с достаточной для практики точностью определить оптимальность технологического процесса производства ППИ.

Наиболее удобным критерием является вероятность брака на отдельной операции, как выявляемого в процессе производства, так и скрытого, выявляемого в процессе эксплуатации.

Особенностью этого критерия является то, что его определение не требует проведения специального эксперимента в процессе производства. Результат контроля, который является органической частью каждого производственного процесса, позволяет определить численное значение этого критерия. Последний позволяет проводить анализ нового технологического процесса и давать оценки необходимости его внедрения.

Достоверно известно, что брак, выявляемый в процессе производства, тесно связан со скрытым браком, выявляемым в процессе эксплуатации.

Установлено, что некоторые автоматические линии проектируются без учета их надежности, например, без учета легкости исправления, ремонта, что во многих случаях приводит к значительному снижению эффективности работы линий, следовательно, к снижению надежности производства изделий.

Использование критерия вероятности брака позволяет судить и о надежности методов контроля. Рекомендуется широкое использование методов сравнения как для целей регулирования технологических процессов, так и для целей контроля.

Установлено, для повышения надежности технологического процесса нужно стремиться организовать его при возможно меньшем участии человека, с изоляцией этого технологического процесса от окружающей среды. Применение механизации и автоматизации технологических процессов, кондиционированного воздуха, защиты от электростатических разрядов и пр. – все это мероприятия по повышению надежности изделий.

При участии в технологических процессах оператора необходимо учитывать влияние его психофизиологических факторов на надежность этого процесса.

Необходимо помнить, что ритмичность производства существенно уменьшает число ошибок, связанных с влиянием психофизиологических факторов.

Для многих технологических операций его критерий в существенной степени зависит от работоспособности (от тренированности) оператора. Точность работы оператора в разное время дня бывает неодинаковой.

Как показывает эксперимент, максимальная точность в работе оператора наступает не сразу после начала действия, а спустя некоторое время. Время этого начального периода зависит от многих причин, основными из которых являются: характер и длительность предварительной тренировки.

Наличие предварительной тренировки уменьшает время, необходимое для вхождения в оптимальный режим работы.

Если влияние оператора на точность и надежность действия аппаратуры в процессе эксплуатации может меняться в значительной степени, то задача заключается в создании методов ограничения этих колебаний в процессе эксплуатации.

Это в такой же степени относится и к неритмичной работе. Если нельзя организовать ритмичную работу, то нужно найти способы ограничения воздействия неритмичности производства на надежность выпускаемых изделий.

Для обеспечения надежности ППИ могут быть использованы следующие методы:

- пооперационный контроль качества;
- стандартизация операций производственного процесса;
- введение сборочных конвейеров;
- введение дополнительных отбраковочных операций;
- проведение факультативных испытаний.

В связи с тем, что в настоящее время при сравнительно высоких уровнях надежности ППИ классическая процедура контроля надежности оказывается практически неприемлемой из-за чрезмерно большого объема специальных испытаний, возникает необходимость перехода от непосредственного и разрушающего контроля надежности изделий к контролю косвенному и неразрушающему. Для этого можно эффективно использовать информацию, получаемую в ходе технологического процесса, а задачу контроля надежности свести к задаче контроля технологического процесса и оценки его стабильности. На основе оценки стабильности производства (технологического процесса) могут быть построены алгоритмы группового прогнозирования надежности изделий, применение которых позволит уменьшить объем периодических испытаний на надежность.

В области производства ППИ продолжают развиваться возникшие несколько лет назад тенденции совершенствования технологических процессов.

Усовершенствование технологии производства и применение новейшего оборудования могут в полной мере способствовать повышению технико-экономической эффективности производства только при наличии квалифицированных и рационально организованных рабочих кадров. С целью решения проблем, связанных с повышением производительности труда и качеством выпускаемых изделий, многие зарубежные фирмы проводят различные мероприятия, направленные на достижение этой цели. Изучаются предпосылки моральных и материальных стимулов поведения рабочих и факторы, способствующие повышению качества с одновременным повышением производительности труда. Уделяется большое внимание налаживанию производственных связей между работниками фирмы на различных служебных уровнях. Выявляются и используются творческие способности рабочих путем предоставления им возможности принимать участие в усовершенствовании конструкции и технологии.

Одна из главных задач при внедрении систем управления качеством ППИ в процессе производства - задача оптимизации контроля качества. Оптимизация контроля достигается, в частности, обеспечением достоверными, достаточными и представленными в удобной форме сведениями о возникающих отклонениях в процессе производства, а также правильной оценкой допустимости выявленных отклонений. В связи с этим при контроле необходимо оценивать и учитывать техническое состояние изделий не только в данный момент времени (в данном месте технологического процесса), но и тенденцию изменения этого технического состояния. Прогнозирование технического состояния изделий электронной техники в процессе производства может быть использовано для решения ряда производственных задач по обеспечению контроля и управлению качеством. К этим задачам относятся:

- оперативная оценка критерия качества партии ППИ, определение доли дефектных изделий;
- определение области оптимальной начальной настройки параметров технологического процесса (операции);
- организация входного контроля комплектующих изделий и материалов;

обоснование режимов технологических испытаний;  
отбраковка потенциально ненадежных изделий;  
корректировка конструкции, технологии или условий применения изделий.

Опыт работы позволил авторам разработать систему получения и использования информации при проведении работ по повышению надежности ИС в процессе их серийного производства (рис. 2.6).

## **2.6. Требования по обеспечению и контролю качества интегральных схем в процессе производства**

В отечественной электронной промышленности существуют директивные документы, которые определяют общие требования к обеспечению и контролю качества в процессе производства.

Например, для ИС эти требования сформулированы следующим образом.

На предприятии-изготовителе ИС должны действовать документы, устанавливающие:

- а) порядок обучения и аттестации производственного персонала, участвующего в изготовлении и контроле качества ИС по всему технологическому процессу;
- б) порядок проверки производственного оборудования, периодичность проверки и, в необходимых случаях, методы его проверки;
- в) порядок проверки выполнения требований, предъявляемых к производственным помещениям и рабочим местам (запыленность, влажность, температура, агрессивные среды);
- г) порядок проверки технологического процесса;
- д) порядок учета, хранения, обращения конструкторской и технологической документации;
- е) порядок и методы входного контроля поступающих материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий;



- ж) порядок проведения анализа дефектных ИС и осуществления мероприятий по устранению причин их появления;
- з) порядок организации анализа и учета технологических потерь в производстве;
- и) порядок анализа рекламаций и согласования мероприятий, внедряемых в производство по результатам анализа.

Конструкторская и технологическая документация, по которой изготавливают ИС, а также все изменения этой документации должны оформляться в соответствии с действующими системами требований к конструкторской и технологической документации.

Изготовление ИС всех типов, входящих в одну серию и выпускаемых на различных предприятиях-изготовителях, должно производиться по единой конструкторской документации, а также по единой технологической документации на основные технологические процессы.

Перечень основных технологических процессов, а также основных применяемых материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий разрабатывает предприятие-держатель подлинников. Допускается применение различного оборудования для выполнения одинаковых технологических операций при обеспечении им заданного технологической документацией режима.

В составе технологического процесса должны быть предусмотрены 100 %-ные отбраковочные испытания. Перечень обязательных отбраковочных испытаний предусматривается в директивных документах (общих технических условиях и технических условий на интегральные схемы).

Изменения в конструкторскую и технологическую документацию, приводящие к изменению норм в стандартах или технических условиях на ИС конкретных типов, вносят только после утверждения в установленном порядке решения о внесении соответствующих изменений в стандарты или технические условия на интегральные схемы конкретных типов.

Изменения в конструкторской и технологической документации, не приводящие к изменению норм, должны быть согласованы с техническим контролем.

ИС в процессе производства должны сопровождаться документацией (сопроводительными листами) по форме, принятой в установленном порядке на предприятии-изготовителе.

Нормы, устанавливаемые в технологической документации для проверки ИС в целом, кроме функционального контроля, должны быть более жесткими в сравнении с нормами, устанавливаемыми в стандартах или технических условиях на ИС конкретных типов.

Предприятие-изготовитель совместно с техническим контролем ежемесячно проводит обобщение данных по проценту выхода годных ИС с указанием основных дефектов, обнаруженных в производстве за истекший период, а также данных об уровне сдачи партий в технический контроль с первого предъявления.

Если производственный брак ИС или число рекламаций на них резко возрастает, то изготовитель анализирует причины увеличения брака и рекламаций. На основании анализа предприятие-изготовитель разрабатывает необходимые мероприятия и внедряет их в производство.

### **Контрольные вопросы**

1. Распределение, характеризующее производственный процесс.
2. Индекс воспроизводимости и коэффициент возможности производства.
3. Коэффициент выхода годных. Влияние дефектности на процесс выхода годных.
4. Функциональные признаки отказов технологического процесса.
5. Управляемость и стабильность технологического процесса. Коэффициент управляемости и показатель стабильности.
6. Применяемые показатели технологической операции.
7. Надежность контрольных операций.
8. Надежность технологического процесса.
9. Активный метод контроля технологического процесса.

10. Условия, определяющие критерий прогрессивности.

11. Организационно-технологические мероприятия по обеспечению заданной надежности при производстве ППИ.

12. Система получения и использования информации при проведении работ по повышению надежности ИС в процессе серийного производства.

13. Требования по обеспечению и контролю качества ИС в процессе производства.

### **3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Одной из основных мер при повышении эффективности производства и качества выпускаемой продукции является контроль и управление качеством технологических процессов (ТП).

Организация обеспечения качества изделий в процессе производства тесно связана с организацией самого производства и развивалась вместе с ним. Появилась необходимость в разработке таких методов контроля, которые могли бы обеспечить предотвращение массовых отказов при одновременном сокращении трудоемкости контрольных операций. К числу наиболее распространенных в отечественной и зарубежной практике методов относятся статистические методы контроля изделий и регулирования технологических операций и процессов. Их внедрение в производство ознаменовало начало перехода от обеспечения качества путем простой разбраковки готовых изделий на годные и брак к оперативному управлению качеством и предотвращению появления массового брака вследствие разладки технологического процесса.

В единой системе управления качеством, охватывающей все стадии жизненного цикла изделия (разработка–производство–эксплуатация), этап производства является основным, так как на этом этапе (от входного контроля исходных материалов до выходного контроля готовых изделий) обеспе-

чивается вещественная реализация всех параметров качества изделия, заложенных на этапе конструирования и сохраняемых на этапе эксплуатации.

Общей целью любых систем управления качеством на этапе производства является обеспечение изготовления изделий в полном соответствии с требованиями нормативно-технической документации НТД (технические условия плюс конструкторская документация) при минимальных затратах.

Недостаточная изученность подчас сложнейших технологических операций, вероятностный характер их протекания и недостаточная управляемость обуславливают в большинстве случаев сравнительно низкий уровень выхода годных изделий. Обычно после запуска в производство новой ИС уровень выхода годных постоянно растет, что объясняется отработкой технологических режимов, выявлением и использованием возможностей управления технологическими операциями, повышением квалификации исполнителей и т.п., и в течение трех – пяти лет может быть повышен в 2 – 5 и более раз. Одним из основных путей реализации этих резервов является организация системного анализа технологического процесса. Главным же инструментом системного анализа являются вероятностно-статистические методы.

Вторым направлением обеспечения качества изделий является стабилизация технологических операций и процессов, то есть максимальное уменьшение разброса параметров, определяющих изделие на данной операции, а также своевременное обнаружение тенденции разладки процессов и устранение причин этой разладки до появления массовых отказов. Реализация этого направления осуществляется путем своевременного регулирования технологических режимов, в идеале с помощью автоматических средств и систем. Различные способы регулирования технологических процессов также основываются на статистических методах оценки их состояния.

И третье – сокращение затрат на контроль путем замены сплошного, т.е. 100 %-ного, контроля выборочным. Выборочный контроль будет эффективным только тогда, когда он основывается на методах теории вероятностей и математической статистики.

Таким образом, в системе управления качеством при производстве ИС широко используются:

методы статистического анализа технологического процесса;  
методы статистического регулирования хода технологических операций и процесса в целом;  
методы выборочного статистического контроля качества продукции.

С усложнением ИС, т.е. с выпуском БИС и СБИС, значение этих методов и умение их применять становится необходимым для широкого круга специалистов.

Информационной базой задач статистического анализа являются параметры:

контролируемых элементов кристаллов ИС;

тестовых структур, специально изготавливаемых и расположенных на каждом кристалле ИС;

тестовых структур в составе специальных тестовых ячеек, изготавливаемых на пластинах одновременно с кристаллами ИС;

структур контрольных пластин-спутников;

статические, динамические и другие, контролируемые на кристаллах и готовых ИС.

Одной из основных задач систем статистического анализа технологии ИС – задача выявления доминирующих параметров операционного контроля схем.

Основными точками сбора информации о качестве на стадиях изготовления ИС, как правило, считаются операции:

диффузионно-окислительные;

фотолитография и травление;

проверка параметров и внешнего вида структур – кристаллов на пластине;

приварка внутренних выводов;

проверка параметров при нормальных условиях и при крайних температурах;

проверка герметичности схем.

Например, на диффузионно-окислительных операциях рекомендуется осуществлять контроль следующих параметров:

поверхностное сопротивление;

глубина залегания диффузионных слоев;  
толщина эпитаксиальных пленок;  
пористость и толщина диэлектрических слоев;  
напряжение отсечки C-V-характеристик;  
коэффициент усиления прямой и инверсный;  
толщина проводящих слоев;  
пробивное напряжение коллектор-эмиттер;  
сопротивление тестового резистора;  
пороговое напряжение;  
переходное сопротивление контактов между проводящими слоями и легированными областями.

При статистическом контроле производственных процессов происходит их непрерывное совершенствование и повышение за счет этого качества изделий. Наряду с информацией, получаемой в процессе производства, статистический контроль качества производства учитывает также результаты анализа изделий, отказавших в эксплуатации, т.е. скрытые дефекты, при этом результаты анализа соотносятся с ходом технологического процесса, учитывается, на каком этапе технологического процесса появился дефект, послуживший основой для образования дефекта, разрабатываются меры для совершенствования технологического процесса повышения качества исходных материалов и пр.

Необходимо отметить, что статистические методы контроля качества продукции применимы только к управляемому, стабильному производству.

### **3.1. Анализ технологических процессов и применение для этой цели качественных диаграмм**

Управление качеством в процессе производства осуществляется путем принятия и реализации решений в двух основных направлениях:

обеспечение мер для ликвидации возникающих нарушений нормального хода процесса и предотвращения возможностей повторения этих нарушений;

реализация мероприятий, направленных на совершенствование процесса (снижение затрат, уменьшение брака и повышение выхода годных, сокращение расхода материалов и т.п.).

Эффективность принимаемых решений в значительной степени обуславливается объемом и составом информации, находящейся в распоряжении инженера, принимающего решение. Для правильной оценки имеющейся информации необходимо проанализировать состояние объекта управления: технологическую операцию, технологический процесс или его часть, состояние качества исходных материалов, уровень качества готовой продукции и т.п. Поэтому анализ технологического процесса является начальным и базовым этапом совершенствования системы управления качеством на предприятии.

К качественным методам анализа технологических процессов, кроме построения широко известных гистограмм распределения какого-либо параметра качества, относятся:

построение диаграмм взаимозависимости различных факторов (диаграмма причин и результатов, т.е. диаграмма Исикава);

метод выделения наиболее важных факторов, влияющих на качество (диаграмма Парето).

### **3.1.1. Метод построения диаграмм причин и результатов**

Результат процесса зависит от многочисленных факторов, между которыми существуют отношения типа причина-результат. Можно определить структуру или характер этих многофакторных отношений благодаря систематическим наблюдениям, изучению технической литературы, опроса

специалистов и т.п. Трудно решить сложные проблемы, не зная этой структуры, которая представляет собой цепь причин и результатов. Диаграмма причин и результатов - средство, позволяющее выразить эти отношения в простой и доступной форме. Эта диаграмма была предложена в 1953 г. профессором Токийского университета Каору Исикава и носит его имя.

Диаграмма причин и результатов – диаграмма, показывающая отношение между показателями качества и воздействующими на них факторами. В настоящее время эта диаграмма используется во всем мире не только применительно к показателям качества продукции (рис. 3.1), но и в других областях.

Диаграмму причин и результатов иначе называют диаграммой "рыбий скелет", поскольку она напоминает скелет рыбы, что видно на рис. 3.2. Иногда ее также называют деревом или диаграммой "речных притоков". Воспользуемся в дальнейших рассуждениях названием "рыбий скелет".

Метод построения диаграммы по этапам следующий:

Этап 1. Определяется показатель качества.

Этап 2. Выбирается показатель качества и пишется в середине правого края чистого листа бумаги (рис. 3.2). Слева направо проводится прямая линия ("хребет"), а записанный показатель заключается в прямоугольник. Далее пишутся главные причины, которые влияют на показатель качества, и соединяются с "хребтом" стрелками в виде "больших костей хребта".

Этап 3. Пишутся причины (вторичные), влияющие на главные причины ("большие кости"), и располагаются в виде "средних костей", примыкающих к "большим". Затем пишутся причины третьего порядка, которые влияют на вторичные причины и располагаются в виде "мелких костей", примыкающих к "средним".



Этап 4. Ранжируются факторы по их значимости и выделяются особо важные, которые предположительно оказывают наибольшее влияние на показатель качества.

Этап 5. Пишется вся необходимая информация на диаграмме.

Применяя эту процедуру на практике, зачастую можно сталкиваться с трудностями.

Наилучший способ в этом случае – рассмотреть проблему с точки зрения "изменчивости". Например, думая о "больших костях", рассуждают об изменениях в показателе качества. Если данные показывают, что изменения существуют, определяют, почему так происходит. Изменение результата может обуславливаться изменениями в факторах. Анализируя данные по конкретному дефекту, можно обнаружить, что число дефектов, допускаемых в разные дни недели, различно. Если обнаружится, что дефекты более часто встречаются в начале смены и после обеденного перерыва, чем в другие часы, задайтесь вопросом: "А почему дефекты в это время допускаются чаще, чем в другие часы?", "Почему они возникают?".

Это заставит обратиться к рассмотрению факторов, которые отличают указанное время работы от остального, что в результате приведет к обнаружению причин дефекта.

Прибегнув к такому способу рассуждений на каждой стадии исследования отношений между показателями качества и "большими костями", между "большими" и "средними", а также между последними и "мелкими костями", возможно логическим путем построить полезную диаграмму причин и результатов.

После того, как завершено построение диаграммы, следующий шаг – распределение факторов по степени их важности. Не обязательно все факторы, включенные в диаграмму, будут оказывать сильное влияние на показатель качества. Обозначают те, которые, на взгляд составителя, оказывают наибольшее значение.

И последнее. Наносится на диаграмму вся необходимая информация: ее название, наименование изделия, процесса или групп процессов, дата и т.д.

Если рассмотреть основные причины разброса любого параметра качества готовых изделий или изделий на любой стадии технологического процесса, то эти причины укрупненно можно разбить на четыре группы:

возникающие из-за колебаний свойств исходных материалов и комплектующих изделий;

возникающие из-за колебаний параметров оборудования и оснастки;

возникающие вследствие влияния факторов, связанных с деятельностью исполнителей;

обусловленные особенностями применяемых технологических методов изготовления и контроля.

Следующим шагом является выявление факторов, из которых складывается совокупное влияние каждой из перечисленных выше причин. Например, на качественные показатели ИС могут влиять, во-первых, параметры качества кремниевых пластин (геометрические размеры и форма, физическое состояние, например, глубина деформированного слоя или количество дислокаций в единице объема или поверхности, химический состав, т.е. наличие и процентное содержание примесей и т.п.), во-вторых, параметры качества воды, применяемой при очистке (степень очистки, состав минеральных и органических примесей, температура) и, в-третьих, параметры качества фоторезиста, применяемого при фотолитографии (чувствительность, разрешающая способность, адгезивная способность, время экспонирования и т.д.). Все это вместе взятое, а также конкретные свойства других материалов, применяемых при изготовлении ИС, и составляет комплекс причин, объединенных в общую группу влияния исходных материалов. Аналогично можно детализировать каждую из других групп основных причин, в результате чего может быть составлена диаграмма Исикава (рис. 3.1).

Следует учитывать, что использование диаграммы Исикава для анализа процессов производства имеет и некоторые недостатки, а именно:

поскольку составление диаграммы осуществляется людьми на основе их субъективных представлений о процессе, не исключена субъективная трактовка отдельных связей причин и факторов, и

всегда есть опасность, что при систематизации возможных причин какая-то одна, даже очень важная, может быть пропущена;

одна и та же причина может быть записана несколько раз в разных местах диаграммы, что затрудняет оценку влияния на конечный результат (параметры качества готового изделия) тех причин, которые обусловлены совокупным воздействием нескольких факторов;

чем более подробна диаграмма, тем труднее определить связь между мелкими (очень подробно конкретизированными) причинами и конечными результатами процесса.

Для уменьшения влияния этих недостатков рекомендуется поручить составление диаграммы Иискава независимо сразу нескольким исполнителям, после чего организовать совместное обсуждение имеющихся в диаграммах различий. Такой метод не только позволяет уточнить неясные вопросы и уменьшить влияние субъективности на выявление причинно-следственных связей в процессе производства, но и использовать это обсуждение для повышения уровня знаний сотрудников о производственном процессе.

### 3.1.2. Метод выделения наиболее важных факторов,

влияющих на качество изделий

При проведении анализа производства весьма важно сосредоточить внимание на важнейших проблемах. В связи с этим особое значение приобретает методология выделения из множества проблем таких, решение которых обеспечивает наибольшую эффективность. Для этого целесообразно пользоваться так называемой диаграммой Парето, названной в честь итальянского экономиста В. Парето. Она представляет собой график-диаграмму, по оси абсцисс которой откладывают после-

довательно различные элементы изучаемого явления, а по оси ординат – вклад каждого элемента в общий результат.

Например, если изучаются потери от брака, то по оси абсцисс откладывают различные виды брака, а по оси ординат – потери, обусловленные наличием брака каждого вида. При этом элементы изучаемого явления должны откладываться по оси абсцисс в порядке убывания вклада каждого явления.

В качестве примера рассмотрим диаграмму Парето для пооперационных потерь при изготовлении кремниевых интегральных схем стабилизаторов напряжения серии КР 142 (табл. 3.1).

По данным графы 5 табл.3.1 построена зависимость потерь на операциях при изготовлении ИС серии КР 142 – диаграмма Парето (рис. 3.3).

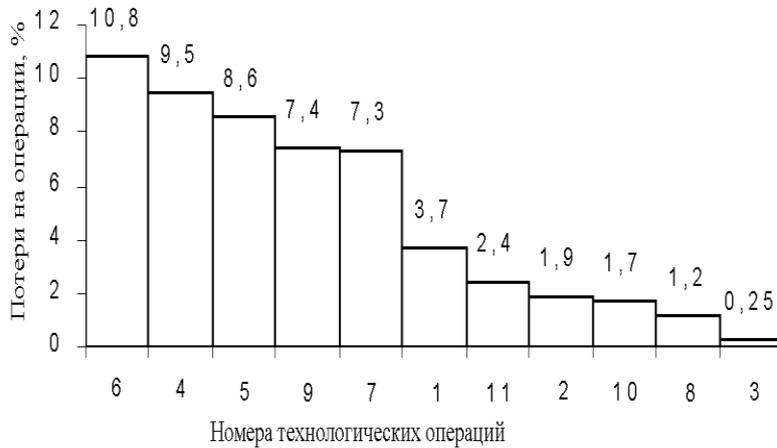
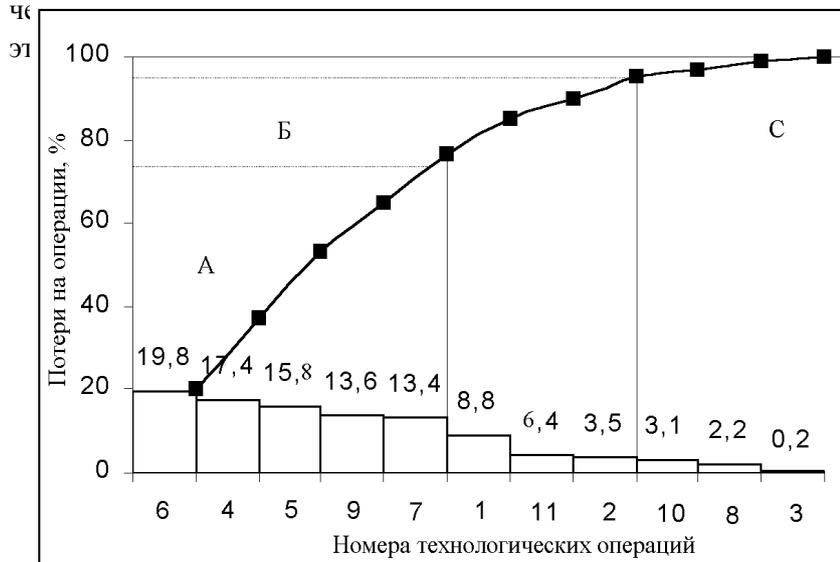


Рис. 3.3. Зависимость потерь на операциях при сборке ИС серии КР142 (диаграмма Парето). Номера технологических операций приведены в порядке убывания потерь

Из рис. 3.3 видна характерная особенность диаграммы: небольшое количество операций является источником основной доли потерь. Эта особенность является отражением общего принципа Парето, который гласит, что для любого результата, являющегося следствием многих причин, небольшое количество причин оказывает сильное влияние на этот результат, в то время как очень большое

количество остальных причин оказывает малое влияние на результат. Именно поэтому диаграмма Парето позволяет выделить те главные элементы (в данном примере – операции), которые являются важнейшими и требуют первоочередного внимания.

Для более четкого выделения важнейших элементов рекомендуется построение нормированной диаграммы Парето. Для этого сумму потерь всех элементов приравнивают к 100 % и вычисляют значения потерь (графа 6 табл. 3.1). По



ммы потерь (графа 6 табл. 3.1). По

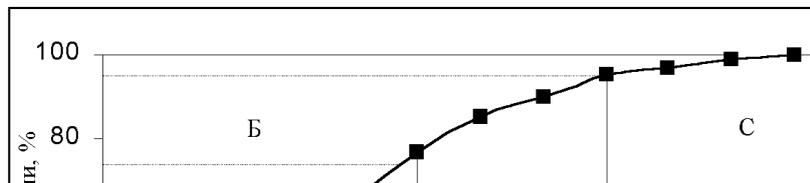


Рис. 3.4. Потери на операциях при изготовлении ИС серии КР142 (нормированная диаграмма Парето)

Проведя на нормированной диаграмме две линии, параллельные оси абсцисс с ординатами, равными соответственно 75 и 95 %, разбивают все элементы диаграммы (в нашем примере – все операции) на три группы:

группа А (наиболее важная) включает те элементы (операции), которые ответственны за 75 % общих потерь;

группа Б включает элементы, ответственные за 20 % (от 75 до 95 %);

группа В включает элементы, ответственные за оставшиеся 5 % потерь (от 95 до 100 %).

В приведенном примере (рис. 3.4) видно, что потери на пяти операциях (группа А) составляют 80 % от всех потерь, имеющих место в технологическом процессе, в то время как другие шесть операций (группы Б и В) вместе дают только 20 % от общего количества потерь. Очевидно, что для существенного снижения технологических потерь (повышение выхода годных) необходимо в первую очередь рассмотреть и устранить причины потерь (или, по крайней мере, ослабить влияние этих причин на ход процесса) именно на операциях группы А. Диаграмму потерь можно построить и по видам брака для одной технологической операции, например, как показано на рис. 3.5.

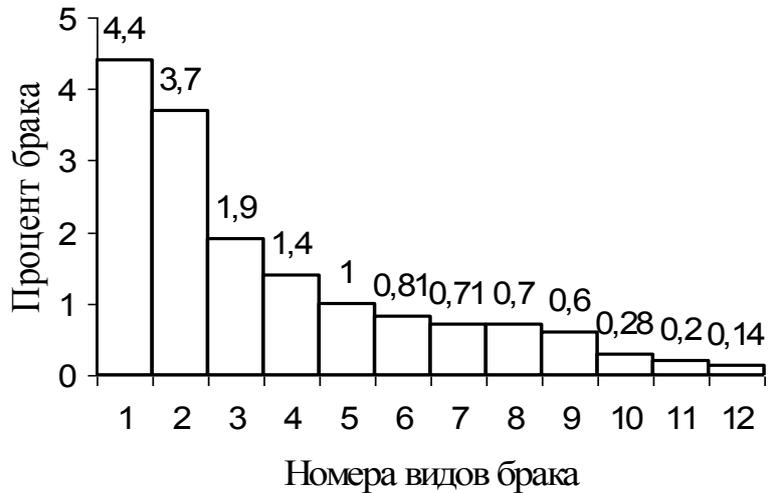


Рис. 3.5. Распределение по видам брака на операции "контроль арматур, собранных" при изготовлении ИС серии КР142:

1 – обрыв внутреннего вывода; 2 – отслоение точки микросварки

на кристалле; 3 – выкол кремния; 4 – отслоение точки

микросварки на траверсе; 5 – царапины металлизации;

- 6 – брак рамки; 7 – передавленные точки микросварки;
- 8 – сколы кремния; 9 – отслоение кристалла;
- 10 – смещение точки микросварки на траверсе;
- 11 – смещение точки микросварки на кристалле;
- 12 – арматуры с пропуском одной или нескольких микросварок

Картину производственных процессов изготовления полупроводниковых динамических запоминающих устройств емкостью 4 Мбайт фирмы IBM дает приведенная на рис. 3.6 диаграмма результатов анализа брака, полученного при высокотемпературных процессах обработки кремниевых пластин.

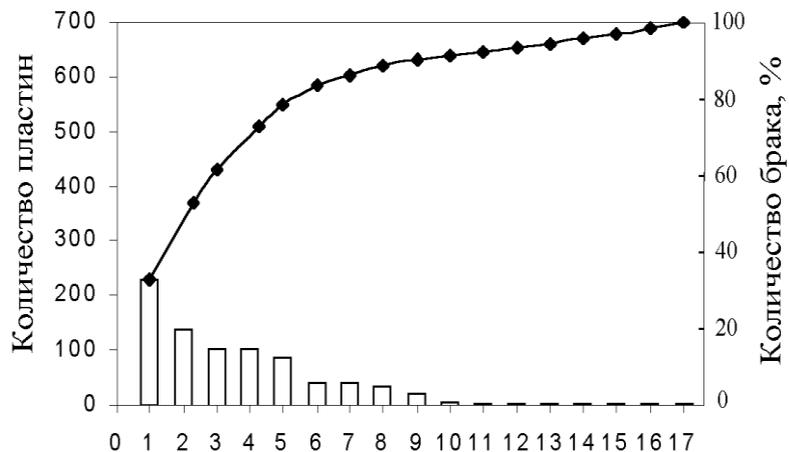


Рис. 3.6. Диаграмма результатов анализа брака при обработке кремниевых пластин (диаграмма Парето):

1 – ошибки (неотработанность) технологии; 2 – неправильная установка параметров оборудования; 3 – повышенная температура печи; 4 – отказы в работе печи; 5 – трещины из-за избыточных нагрузок; 6 – ошибки в размещении инструмента; 7 – утечка деионизованной воды; 8 – отказ инструмента; 9 – сбой в работе роботов; 10 – плохое качество обработки; 11 – некачественные фильтры; 12 – некачественные держатели пластин; 13 – порча при перемещении пластин; 14 – нарушение вакуума при обработке; 15 – недостаточная толщина пластин; 16 – царапины; 17 – ошибки измерительных приборов

Возможны и важны две оценки при анализе брака: доля брака по отношению ко всему производству и вторая-доля брака по какой-либо причине ко всему браку.

### **3.1.3. Точность технологической операции (процесса)**

Зачастую наряду с понятиями управляемости и стабильности технологической операции (процесса) пользуются еще понятием точности технологической операции (процесса). Точность технологического процесса есть свойство этого процесса, обуславливающее близость действительных и номинальных значений параметров по их распределению вероятностей.

Точность технологической операции (процесса) предлагается определять по формуле  $\Delta_0 = 6\sigma$ .

Точность, также как и стабильность технологической операции, в значительной степени определяет уровень качества продукции и вероятность появления брака на операции.

Оценка точности технологической операции осуществляется в производстве не только при проведении анализа процесса, но и в ряде других случаев, например:

при внедрении нового технологического метода, нового оборудования, оснастки;

при проведении проверки соблюдения исполнения технологической операции;

при проведении аттестации качества изделий.

Таким образом, задача оценки стабильности и точности технологической операции может быть отнесена к ряду задач, решаемых с применением статистических методов.

Сравнение значений точности  $\Delta_0$  для выбранного параметра качества и величины поля допуска  $\Delta$  на этот параметр позволяет установить соответствие точности операции требованиям, предъявляемым к конструкции изделия и технологии его изготовления.

Если  $\Delta_0 < \Delta$ , то точность операции  $\Delta_0$  соответствует требованиям производства с запасом, т.е. брак будет отсутствовать даже в том случае, если уровень настройки (положение среднего значения  $\bar{X}$  распределения параметра качества относительно середины поля допуска) будет несколько смещен от номинального значения. В этом случае операция не требует постоянного наблюдения и часто регулирования.

Если  $\Delta_0 \approx \Delta$ , то хотя точность операции и соответствует требованиям производства, но даже при небольшом смещении уровня настройки от номинального значения возникает вероятность появления брака. В этом случае операция требует постоянного наблюдения и своевременного регулирования.

Если  $\Delta_0 > \Delta$ , то брак на операции неизбежен даже при наилучшей настройке (смещение настройки приводит к увеличению процента брака).

В этом случае необходимо:

провести технический анализ возможностей уменьшения среднеквадратичного отклонения на данной операции (за счет повышения точности оборудования, оптимизации режимов, создания более точной оснастки и т.п.);

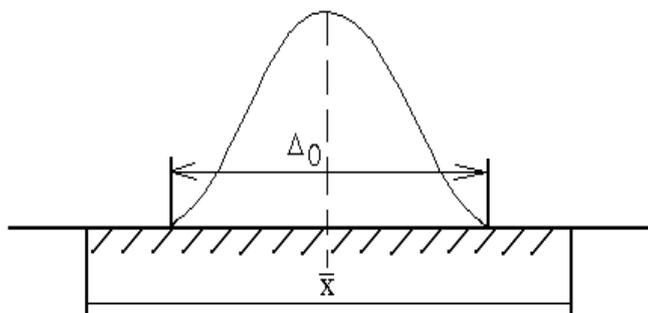
оценить возможность и экономическую целесообразность замены действующего технологического оборудования более точным;

оценить возможность и экономическую целесообразность внедрения новых технологических методов, обеспечивающих повышенную точность.

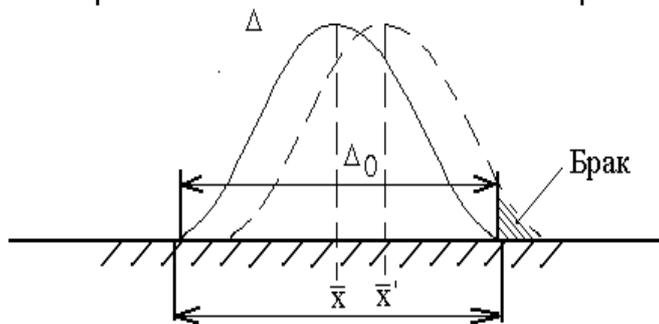
Если указанные мероприятия неосуществимы или экономически нецелесообразны, то вводят 100 %-ную разбраковку изделий после данной операции, либо примиряются с тем, что какая-то часть изделий, передаваемая на последующую операцию, будет бракованной, что учитывают при построении системы контроля на последующих операциях процесса. Различные случаи соотношений  $\Delta_0$  и  $\Delta$  схематически представлены на рис. 3.7.

Стабильность операции проверяется не только при ее анализе, но и при отладке операции после замены материала, инструмента, оснастки или при выходе операции из статистически управляемого состояния; при внедрении нового технологического метода; при проведении аттестации качества продукции.

1



2



3

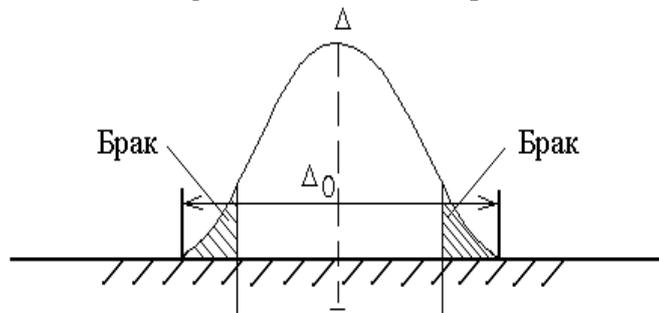


Рис. 3.7. Различные случаи соотношения точности операции при  $\Delta_0 = 6\sigma$  и величины поля допуска  $\Delta$ :  
1 – при  $\Delta_0 < \Delta$ ; 2 – при  $\Delta_0 \approx \Delta$ ; 3 –  $\Delta_0 > \Delta$

### **3.2. Статистическое регулирование технологических процессов**

Вследствие того, что характер протекания технологических процессов изготовления ПШИ носит вероятностный характер, распределение параметров может характеризоваться двумя величинами: центром распределения или положением на числовой оси того интервала, частота которого максимальна, и шириной распределения. Параметры, характеризующие распределение, называются его мерами. Параметр, характеризующий положение распределения на числовой оси, называется мерой положения (среднее арифметическое, мода, медиана). Параметр, характеризующий ширину распределения, называется мерой рассеяния (дисперсия, среднеквадратичное отклонение, размах). Зная меру положения и меру рассеяния для ряда распределений какого-либо параметра качества, имеющего определенный допуск, можно установить:

обеспечивает ли точность процесса изготовления изделий с заданным параметром качества в заданном допуске, т.е. соответствует ли точность процесса требованиям качества изготавливаемой продукции;

обеспечивает ли заданный уровень настроенности процесса получение продукции с параметром качества в заданном допуске, т.е. насколько хорошо настроен технологический процесс.

Поскольку даже очень хорошо отлаженный технологический процесс имеет тенденцию изменять свои параметры (может меняться и мера положения, и мера рассеяния), то необходимо обеспечить математическое наблюдение за ходом процесса с тем, чтобы при обнаружении разладки принять меры к устранению причин ее появления.

Если стабильность и точность технологического процесса обеспечивает изготовление изделий с заданными значениями параметров качества, то говорят, что процесс (операция) является статистически управляемым. Если же при изготовлении изделий имеет место неопределенное значение параметра качества, то говорят, что процесс (операция) вышел из управляемого состояния и необходимо принять меры для его регулировки, то есть возвращения в статистически управляемое состояние.

Статистическое регулирование заключается в том, что на основании данных о состоянии технологического процесса в предшествующие моменты времени прогнозируется его состояние в последующий момент времени и в случае необходимости осуществляется корректирование (управляющее воздействие).

Корректирование значений параметров технологического процесса на основании результатов выборочного контроля параметров качества изделий, осуществляемое в целях обеспечения требуемого уровня качества продукции, называется *статистическим контролем или регулированием технологического процесса*.

Статистический контроль технологических процессов является аналитическим инструментом, используемым при управлении процессом производства изделий. Он давно принят во многих странах

и является эффективным средством для совершенствования процесса производства и увеличения процента выхода годных изделий на каждой технологической операции.

В процессе статистического контроля оценивается "управляемость" технологических процессов; возможность влияния на их результаты изменением условий, допусков; стабильность удержания допусков на параметры изделий во времени.

Статистическое регулирование может осуществляться различными методами. Статистический контроль может проводиться на основании таблиц с численными результатами, на основании гистограмм, графиков распределений и пр. Выбор метода определяется особенностями каждого процесса по сравнению с другими в приложении его к определенному процессу (операции). Наиболее известными, получившими широкое распространение в машиностроении и заимствованные оттуда для использования при производстве изделий электронной техники, в том числе и ИС, являются методы, основанные на применении различных форм контрольных карт.

### **Применение контрольных карт**

Статистическое регулирование технологического процесса с применением контрольной карты – это, по сути дела, статистическое наблюдение за изменением параметра качества изделий во времени и предупреждение брака путем своевременного вмешательства в процесс. Контрольная карта является тем средством, которое позволяет наглядно отобразить ход технологического процесса во времени и таким образом выявить его нарушение.

Контрольная карта представляет собой график, на котором по оси абсцисс откладывают время (вместо времени на оси абсцисс можно откладывать порядковый номер выборки, взятый для определения параметра качества или номер партии и т.п.), а по оси ординат – величину выбранной характеристики ряда распределений параметра качества продукции в данный момент времени.

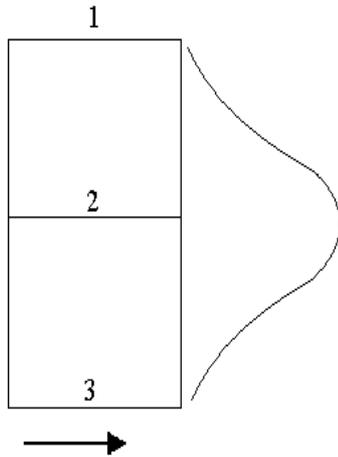
На контрольную карту обычно наносят пять линий: одна линия – среднее или номинальное значение параметра качества; две крайние линии – контрольные пределы – уровень ОТК и две промежуточные – предупредительные. Иногда используют несколько предупредительных линий, соответствующих различным контрольным уровням, например, уровень начальника цеха, уровень главного технолога и т.д.

Как правило, контрольные границы регулирования определяются как  $\pm 3\sigma$ , а в качестве предупредительных границ могут выбираться двухсигмовые пределы, т.е.  $\pm 2\sigma$ .

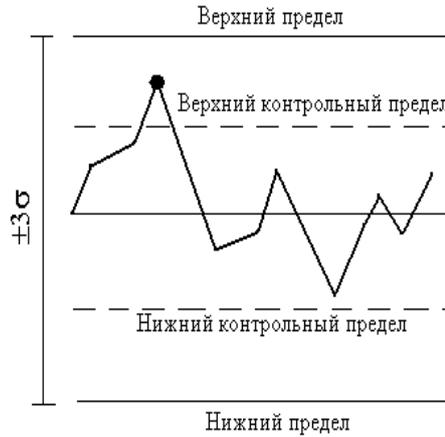
В общем случае расчет границ регулирования – очень важная задача в методе статистического регулирования технологических процессов. Известны два подхода к установлению границ регулирования – метод Шьюхарта и английский. В первом – определяются границы регулирования параметров уровня качества ТП безотносительно величины требуемого допуска на формируемые в ходе ТП параметры изделия. При этом считается, что разладка технологии произошла, если параметр уровня качества превысил свое среднее значение на величину, большую чем  $3\sigma$ . Применение метода Шьюхарта статистического регулирования приводит к увеличенному риску лишних настроек, т.е. к тому, что настройки будут производиться в ряде случаев даже тогда, когда не снижается процент выхода годных, т.е. когда на него не влияет обнаруженная по контрольным картам "разладка". Но для полупроводниковых изделий, определяющих надежность аппаратуры, метод Шьюхарта наиболее целесообразен, как наиболее жесткий по отношению к уровню качества технологии.

В основе английского метода положен принцип: "Никаких лишних настроек", поэтому границы регулирования определяются относительно границ поля допуска, а не относительно среднего уровня, что имеет существенное значение в машиностроении. Из-за отсутствия стационарных связей выхода годных полупроводниковых изделий с измеряемыми информационными параметрами второй метод практически не используется в полупроводниковой промышленности.

Выход значения характеристики ряда распределений (параметра качества) за пределы границ регулирования является сигналом разладки технологического процесса (операции). Общая форма контрольной карты показана на рис. 3.8,а. На рис. 3.8,б показан пример общей контрольной карты с установлением двух границ: верхних и нижних.



а)



б)

Рис.3.8. Общая форма контрольной карты и ее пример  
1 – верхняя граница регулирования; 2 – номинальное значение параметра; 3 – нижняя граница регулирования;  
4 – время или номер выборки

При разработке контрольной карты для статистического регулирования технологической операции необходимо:

- выбрать параметр качества, по которому будет осуществляться оценка состояния технологической операции или процесса;
- установить объем выборки для оценки этого параметра;
- определить границы регулирования для выбранного параметра качества;
- установить периодичность взятия выборок.

Существует много разновидностей контрольных карт. Их можно разделить на два вида: контрольные карты количественных признаков и контрольные карты качественных признаков.

Контрольные карты количественных признаков основываются на применении для оценки состояния технологической операции таких параметров качества, которые поддаются измерениям. В этих контрольных картах содержится информация о мере положения и мере рассеяния параметра качества.

Выбор определенной меры (среднее  $\bar{X}$  или медианное  $Me$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  или размах  $R$ ) определяется конкретными особенностями данной операции, спецификой применяемых средств измерения и обработки данных, особенностями организации рабочего места и т.п.

Контрольные карты качественных признаков основываются на применении для оценки состояния технологической операции таких параметров, как доля брака в партии изделий, процент выхода годных по технологическим операциям, по участкам или изделию в целом.

Контрольная карта ( $\bar{X} - R$ ) по количественным признакам состоит из контрольной карты средних значений  $\bar{X}$ , осуществляющей контроль за измерением настроенности технологической операции, и контрольной карты размахов  $R$ , осуществляющей контроль за изменением точности технологической операции.

Порядок разработки такой контрольной карты следующий:

для установления границ регулирования контрольной карты используют данные не менее, чем по 20 – 25 выборкам (при этом обязательно следят за тем, чтобы уровень качества изделий в этот период оставался стабильным);

установив границы регулирования и выбрав периодичность взятия выборок, ведут контрольную карту, нанося точки по результатам измерения параметров качества в выборке;

если в период взятия еще 20 – 25 выборок точки, соответствующие значениям параметра качества, не выйдут за пределы установленных границ регулирования, то по этой контрольной карте продолжают вести регулирование операции; если же будет замечено, что точки выходят за пределы границ регулирования, то выявляют причину этого явления, принимают меры к ее устранению, после чего границы регулирования пересчитывают заново.

Классические ( $\bar{X} - R$ ) контрольные карты редко используются на предприятиях электронной промышленности, имеющих дело с производством полупроводниковых пластин. Это происходит потому, что такие контрольные карты чаще всего удобно применять в тех случаях, когда имеется лишь одна причина вариации качества. Тогда контрольная карта четко фиксирует отклонение определенного параметра, элемента технологии и указывает на пути стабилизации. При производстве полупроводниковых пластин имеется много вероятных причин отклонения размеров, качества, а выход за установленные пределы контролируемого параметра чаще всего может послужить только причиной поисков в определенном направлении.

Контрольная карта ( $\bar{X} - R$ ) имеет некоторые недостатки, заключающиеся в том, что она требует вычислений среднего значения  $\bar{X}$  по каждой выборке, а это в условиях производства не всегда удобно. Кроме того, она чувствительна к грубым ошибкам при измерении и вычислении. Поэтому во многих случаях вместо такой карты используют контрольную карту ( $Me - R$ ) по медиане  $Me$  и размаху  $R$ , которая несмотря на меньшую точность оценки настроенности технологической операции не требует проведения вычислений при взятии выборок и нечувствительна к грубым ошибкам при измерениях. Порядок разработки контрольной карты ( $Me - R$ ) аналогичен карте ( $\bar{X} - R$ ).

Контрольные карты регулирования технологической операции (процесса) по доле брака  $W$  или проценту выхода годных  $\eta$  нашли широкое применение в электронной промышленности вследствие простоты ведения, оценки и универсальности. Параметром для оценки состояния технологической операции или процесса в случае карты для  $W$  является количество брака в выборке, выраженное в долях или в процентах.

При уменьшении процента выхода годных изделий серийного производства, установленного в течение одного месяца (но не менее, чем по 20 партиям), от планового в 1,3 раза и в 2 раза и более для вновь осваиваемых изделий, цеховая технологическая служба разрабатывает и выпускает мероприятия по доведению фактического процента выхода годных до планового.

В случаях, когда контрольные карты строятся для критических размеров или параметров изделий, они должны оценивать максимальное количество характеристик процесса производства, чтобы можно было по картам судить о ходе критических процессов. В этих случаях контрольные карты могут быть использованы для оценки:

- среднего значения критического параметра для заданных условий производства;
- стандартного отклонения процесса для заданных условий производства;
- стабильности и технических возможностей технологического процесса.

### **3.3. Система контроля технологического процесса**

В военном стандарте США MIL-STD-883 в приложении "А" даются требования к системе контроля технологического процесса.

Не рекомендуется смешивать контроль продукции с контролем технологического процесса. Они не только различаются средствами осуществления, но и имеют различные конечные цели. При особых условиях они могут быть взаимосвязаны и чрезвычайно эффективны.

#### **3.3.1. Контроль качества изделий в процессе производства**

Конечным результатом контроля качества изделий является исключение из последующих стадий производственного процесса тех изделий, которые изготовлены с дефектами. Основой системы контроля качества является удаление изделий, не созданных надлежащим образом на предыдущих этапах производства.

Необходимо отметить, что эта проверка не является контролем процесса, а только контролем продукции. Если бы случилось так, что производственный процесс был начат со 100 %-но некачественной продукции, то при данном контроле эта некачественная продукция была бы удалена, но это не исправило бы основной проблемы возникновения брака.

Если результаты проверок контрольных постов регистрируются, анализируются и сопоставляются со стандартными значениями, то могут быть приняты меры для исправления любого нарушения технологического процесса. Обратная связь информации воздействует на степень контроля процесса производства, т.е. контроль производства не имеет непосредственного отношения к удалению дефектной продукции.

Обратная связь результатов контроля продукции на контроль технологического процесса имеет своей целью достижение контроля над технологическим процессом.

Контроль продукции в процессе производства состоит из производственного контроля и приемочного контроля качества партии изделий, следующего за производственным контролем.

*Производственный контроль.* Эти проверки выполняются производственным персоналом по принципу "годен – не годен". Даже на этом наименее строгом этапе контроля продукции используется принцип обратной связи. Условием для такого контроля является отчет о выходе годных изделий и система управления контролем технологического процесса, которые проводятся руководством ежедневно и еженедельно, а также гласность о данных контроля.

*Приемочный контроль качества партии.* Там, где наиболее вероятны отклонения, после производственного контроля следует производить приемочный контроль. Решение о приемке партии составляется на основании ТУ и предварительного определения уровня качества. При таких условиях контроля обратная связь служит двум целям.

Во-первых, забракованные партии сразу же соответствующим образом маркируются для того, чтобы привлечь внимание. Следует решить, какие изменения в контроле или процессе производства могут быть предприняты с целью корректировки.

Во-вторых, система управления технологическим процессом показывает тенденции результатов контроля качества, которые распространяются еженедельно по всем отделениям управления. Процентные показатели статистически сравниваются с прошлыми средними значениями и значениями с существенными отклонениями и оцениваются те корректирующие меры, которые приняты.

Примером таких контрольных точек технологического процесса могут служить: контроль слитков монокристаллов, контроль качества партий пластин после эпитаксиального процесса, проверка арматур собранных перед герметизацией, контроль герметичности и электрические испытания. Под понятием "контроль качества" понимается также проверка процесса контроля, который выполняется инспекторами производственного процесса. Инспекторы производственного процесса, используя

анализ отказов и отчет о выходе годной продукции, проводят выборочный контроль принятых и отказавшие изделий и оценивают степень достоверности проведения контрольной операции.

### **3.3.2. Контроль технологического процесса**

Контроль технологического процесса (ТП) направлен на контроль самого процесса и не связан непосредственно с удалением дефектных изделий, но помогает предотвратить изготовление дефектных изделий и облегчает проведение последующего контроля продукции.

Даже при безупречном контроле продукции, при правильном использовании средств обратной связи может быть осуществлен эффективный контроль процесса производства.

Например, в производстве ИС фирмы Texas Instruments (США) контроль процесса производства обеспечивается следующим образом:

- наличием пунктов надзора службы контроля качества в процессе изготовления;
- технической оценкой процесса изготовления;
- производственным контролем;
- анализом отказов дефектных изделий.

В приложении 1 показана схема контроля технологического процесса участка формирования структур ИС на пластине на американской фирме, в приложении 2 – схема технологического контроля операций сборки ИС на отечественных предприятиях.

*Пункты надзора службы контроля качества.* Контроль ТП представляет собой проверку процесса производства в точках, представляющих особый интерес. Например, если на изготовлении сварных соединений работают 30 операторов, то проверяется продукция всех 30 операторов и ежедневно выявляются три наихудших оператора. Внимание контролера каждый день сосредоточено на оценке качества работы оператора. Такой тип контроля называется контролем оператора.

Контроль, при котором для устранения недостатков оборудования требуется корректирующие мероприятия, применяемые обслуживающим персоналом, называется контролем оборудования. Примером такого контроля могут быть ( $\bar{X} - R$ ) – контрольная карта диффузионных печей, визуальное исследование продукции каждого оператора, занимающегося монтажом; проверка прочности соединений внутренних ИС; контроль герметичности спаев.

*Техническая оценка производственного процесса.* Инженерный персонал производит выборочный анализ производственного процесса в нескольких критических точках. Электрические параметры измеряются выборочно от каждой партии для обеспечения контроля в данной точке. Примером этому может служить анализ процесса диффузии, который контролирует производственный процесс на данном этапе.

*Производственный контроль.* Регулярный контроль работы операторов, ритмичность работы линии, контроль оборудования, сравнение эффективности работы различных технологических линий - все это повышает качество изделий.

*Анализ отказов дефектных изделий.* Регулярные испытания на срок службы с анализом отказов проводятся на сериях однотипных изделий. Кроме того, изделия, отказавшие в выбранных точках технологического процесса, подвергаются анализу отказов обычным порядком. Учитывая это, контроль продукции и контроль производственного процесса могут быть отрегулированы таким образом, чтобы исключить механизмы отказов, которые не могли быть обнаружены раньше.

Анализ полной системы контроля качества, которая применяется в ТП, показан в технологических картах. В этих картах приводится также краткое описание каждой контрольной точки.

Система управления ТП с помощью вычислительных машин представляет еженедельно отчет о состоянии контроля в отдельных точках ТП. Так как характеристики ТП в контролируемых точках меняются, проводится их анализ, сопоставляются полученные процентные соотношения со средними значениями, полученными ранее, и вычисляются значения расхождений. Те контрольные точки ТП, которые характеризуются значительным расхождением, в дальнейшем разбираются более подробно с

тем, чтобы дать точную причину этих расхождений с описанием превалирующих дефектов. После чего работа этого участка технологического производства анализируется и принимаются необходимые корректирующие меры. Обобщенный анализ по всему ТП проводится еженедельно и сообщается всем отделениям управления. Такая система отчета в сочетании со своевременной обратной связью обеспечивает эффективный контроль ТП.

### **Контрольные вопросы**

1. Статистические методы управления качеством в производстве интегральных схем.
2. Метод построения диаграмм причин и результатов (диаграмма Исикава).
3. Метод выделения наиболее важных факторов, влияющих на качество ППИ.
4. Точность технологической операции.
5. Статистическое регулирование технологических процессов. Применение контрольных карт.
6. Контроль качества изделий в процессе производства. Преимущество системы контроля.

### **4. ПЕРЕХОД ОТ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА К СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА**

#### **4.1. Общие положения**

Обеспечение качества в настоящее время является обязательным условием каждого производства. Система обеспечения качества предусматривает гораздо большее воздействие на изделия, чем это предусматривается при контроле качества. Нередко под контролем качества понимают только испытания качества. В общем система обеспечения качества характеризуется совокупностью деятельности по административному управлению качеством, планированию качества, регулированию и испытанию качества. Под административным управлением качеством понимают обеспечение общего руководства и определение политики в области качества.

Система обеспечения качества включает в себя решение многих задач, которые возникают в процессе создания изделия. Обеспечение качества должно носить систематический характер.

В процессе обеспечения качества почти все функционирующие системы имеют приблизительно одинаковую структуру и содержат следующие элементы: исходное задание, вход и общий контроль, обеспечение качества во время проектирования, разработка технической документации; закупка, снабжение, поставка комплектующих от смежников, её маркировка и контроль качества; средства контроля, результаты контроля, исследование дефектной продукции, разработка мероприятий; упаковка, складирование, отправка, транспортировка, документация по качеству, наблюдение за уровнем качества после отправки; обучение сотрудников; статистические методы.

Это учитывалось в стандартах DIN ISO 9000 – 9004, которые появились в марте 1987 г. в немецкой стандартизации, а затем были приняты как международные. По другим данным за основу стандартов ISO 9000 была принята серия стандартов BS 5750 (Великобритания).

На этапе изготовления, монтажа и испытаний изделия в соответствии с ISO 9002 выполняется построение системы обеспечения качества, ее структуры, подготавливается документация для обеспечения качества на разных этапах производственного процесса, проводится наблюдение за производственным процессом, испытания на его отдельных этапах, наблюдение за измерительными и испытательными средствами. На этапе конечных испытаний готовых изделий в соответствии с ISO 9003 проводятся окончательные испытания и результаты их документируются.

Известно, что затраты на обеспечение качества могут достигать от 25 до 40 % всей суммы стоимости продукции. Из-за плохого качества теряется до 25 % площадей производственных помещений, до одной трети рабочей смены и до половины оборотных средств.

Является ли последняя производственная операция главной для обеспечения качества продукции? Конечно нет, во всяком случае не всегда. Технология изготовления изделий оказывает значительно большее влияние на качество, чем конечные операции изготовления изделий.

Анализ дефектов, возникающих в процессе производства изделий, показывает, что значительная их часть возникает в начальный период изготовления изделий. Причины дефектов часто лежат в конструкции, то есть являются следствием недостатков, ошибок разработки изделий, а также ошибок планирования производства. Устранение дефектов, как правило, ведется в значительно поздние этапы производства. Принимается, что до 75% отказов ложатся на разработку (конструирование) и подготовку производства.

Устранение дефектов обходится тем дороже, чем дальше по процессу производства осуществляется это устранение. Если устранение дефектов происходит после того, как изделие полностью изготовлено, это, помимо повышенной стоимости устранения, чаще всего вредит также оценке изделия потребителем. Так как производственные процессы, как правило, имеют некоторую долю нестабильности, должны быть предусмотрены превентивные методы, направленные на то, чтобы устранить возможное влияние этой нестабильности на надежность и качество изделий, чтобы из производства, даже с учетом его нестабильности, выходили безусловно надежные изделия. Повышение управляемости производственного процесса позволяет повышать качество и надежность изделий при меньших затратах и меньших запасах по характеристикам изделий.

Техническое состояние процессов и используемая техника обеспечения качества играют большую роль, однако, эти факторы приобретают значение для обеспечения качества только с учетом организационных факторов, которые определяют возможность использования технического состояния процессов производства и реального материального обеспечения производства для совершенствования качества.

Создается единая система контроля качества на предприятии, объединяющая все этапы работ, организующая необходимые обратные связи, позволяющая своевременно выявлять все возможные причины снижения качества и надежности продукции, быстро устранять их, готовить необходимые предупредительные меры, способные заранее подготовиться к возможным сбоям, предупреждать

возможное ухудшение качества. Эта единая система названа *интегральной системой контроля качества* (ИСКК).

Зарубежные фирмы, постоянно работающие над повышением качества выпускаемых ППИ, считают, что в работе по повышению качества изделий в процессе производства нет второстепенных факторов. Например, строгое выполнение установленного ТП, проведение мероприятий, направленных на повышение культуры производства, установление значений на любые входные и выходные параметры "от – до", а не "менее" или "более", применение контрольно-измерительной аппаратуры, позволяющей точно определять значения параметров, а не отвечать на вопрос "годен – не годен", повышение автоматизации производства, компьютерное управление и анализ производства и т.д.

Выполнение намечаемых мероприятий по повышению качества ППИ производится не от случая к случаю, а методически и настойчиво.

Мероприятия по повышению качества и надежности ИС на многих предприятиях считаются наиболее строго охраняемым секретом, в то же время этим вопросом должны заниматься специалисты на всех уровнях, включая администрацию.

Технологический процесс производства для обеспечения высокой надежности должен быть управляем на всех его этапах, технолог должен знать, что он получит в результате данного ТП и с какой точностью, т.е. процент выхода годных и его допустимый разброс от партии к партии.

Обеспечение управления технологическим процессом начинается с процессов, определяющих подготовку производства. Обеспечение ритмичности производства существенно уменьшает количество ошибок человека, влияющих на качество изделий.

До относительно недавнего времени многие изготовители пытались обеспечить качество и надежность ИС с помощью жестких испытаний на завершающем этапе изготовления. В настоящее время мнение по этому вопросу, сложившееся под влиянием японских фирм, таково, что наиболее важным шагом на пути к созданию высококачественных ИС является разработка ее конструкции. Для этого используется автоматизированное проектирование ИС на ЭВМ, очень точно описывающие

готовые схемы, вводятся в состав кристаллов БИС тестовые структуры для самопроверок и для контроля характеристик ТП.

Поэтому как нельзя более кстати появилась идея бездефектного производства. Мысль о том, что брак должен вообще исчезнуть, со статистической точки зрения, представляется абсурдной. Поэтому инженеры часто выступали против этой идеи, вынося ее на счет отсутствия вероятностного мышления. Однако как идеал, как цель, к которой стоит стремиться, помня и о недостижимости и об экономике, концепция "нуль дефектов" вполне разумна и приносит важные плоды.

#### **4.2. Японский метод качественного изготовления продукции**

В настоящее время Япония – общепризнанный лидер в области качества и надежности технических изделий. По оценке ведущего американского специалиста доктора Дж. М. Джурана (рис. 4.1.) сначала японцам понадобилось около 20 лет, чтобы догнать США, затем уже американские фирмы, обнаружив, что они все больше проигрывают в качестве своих товаров, сумели путем энергичных мер (в том числе и путем использования японского опыта) переломить эту тенденцию. В результате разрыв в качестве американских и японских изделий перестал, по крайней мере, увеличиваться.

Ориентация японской промышленности на выпуск продукции высокого качества началась в 50-х годах, когда было введено понятие *полного контроля качества* (ПКК), охватывающее всю сферу производства.

Основные принципы современной системы контроля качества были заимствованы японскими фирмами у США в начале 60-х годов, когда по образу американских групп "нулевого дефекта" на японских предприятиях появились "кружки контроля качества".

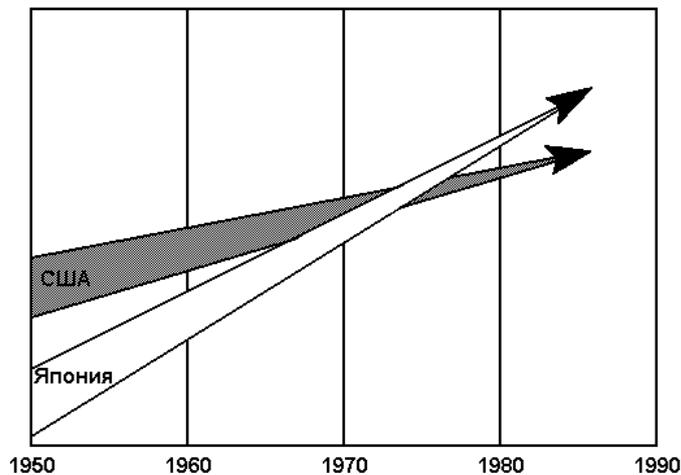


Рис. 4.1. Тенденция повышения качества продукции в Японии и США

Японские специалисты выявляют три стадии в развитии подходов к решению производственных проблем и повышению качества и надежности.

1. Проблемы выявляются, анализируются руководством и направляются для решения на нижние уровни.

2. Проблемы выявляются; комплексная система управления качеством (КСУК) находит и устраняет причины возникновения проблем; информация направляется на другие уровни организационной структуры, чтобы исключить повторение таких проблем.

3. Проблемы предотвращаются; потенциальные проблемы и их причины изучаются до их возникновения; необходимая информация направляется на нижние уровни, чтобы надежно заблокировать возникновение проблем.

В основе японского метода бездефектного изготовления ППИ лежит представление о том, что обеспечить выпуск качественной продукции легче, если закладывать качество в изделия с самого начала, так как в результате этого возрастает выход годных, снижается стоимость изделия, а процедуры контроля становятся почти избыточными. При разработке структуры ИС и технологии ее изготовления учитываются возможности технологического процесса.

Японские разработчики уделяют больше внимания и времени (чем их американские коллеги) "доводке конструкции" нового изделия, т.е. устранению причин возможных отказов до запуска его в производство с учетом опыта разработки и производства предыдущих изделий.

Японские инженеры проводят в 2 – 3 раза меньше изменений, чем их американские коллеги. Японские инженеры проводят работы в трех основных областях: в области взаимодействия с потребителями, учета опыта изготовителей и обучения методам управления качеством. Для японских фирм частота технических изменений уменьшается при приближении к моменту начала выпуска продукции, а для западных фирм увеличивается.

В Японии сформированы семь основных принципов комплексной системы управления качеством (КСУК): полный контроль производственного процесса, наглядность результатов измерения показателей качества, соблюдение требований к качеству, остановка производственных линий, самостоятельное исправление ошибок, 100 %-ная проверка изделий и поэтапное улучшение качества.

Высокое качество выпускаемых изделий обеспечивается 100 %-ным входным контролем получаемых материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий. Большое внимание уделяется также анализу причин отказов ППИ в процессе сборки и во время эксплуатации.

Компании используют очень малое количество операций контроля качества непосредственно в процессе производства, полагаясь в этом случае на высокий уровень автоматизации сборочных процессов полупроводникового производства и высокий профессиональный уровень рабочих.

Основа совершенствования производства – экспериментирование на реальном производстве ППИ. Казалось бы слово "эксперимент" не совместимо с серийным производством, в Японии же считают, что нет другого способа постоянно совершенствовать технологические процессы.

Борьба за бездефектность начинается с проблемы измерений. Каждое изделие обычно – плод напряженного труда. В ходе производства комплектующие изделия, а затем и само изделие переходят от одного рабочего к другому. Для предотвращения брака готового изделия важно локализовать потенциальный брак как можно раньше. Поэтому каждого, кто участвует в производственном процессе, удобно рассматривать как автономное производство со своей системой входного и выходного контроля. Организацию входного и выходного контроля на каждом рабочем месте часто называют автономизацией. На первый взгляд она противостоит статистическим методам контроля качества. В действительности же благодаря автономизации создается устойчивый поток оперативной информации с каждого рабочего места.

Для осуществления принципа автономизации на предприятиях существует одно из главных правил для рабочих, так называемое "правило трех", которое означает, что рабочий должен хорошо знать три операции и требования по качеству к ним: свою, предыдущую и последующую операции. Отсюда брак, пропущенный предыдущим рабочим, не должен пройти на следующую операцию.

Чтобы собираемая при автономизации информация работала эффективно, каждому рабочему дается возможность останавливать весь технологический процесс, если он сталкивается с трудностями,

угрожающими появлением брака. При каждой остановке мастер и рабочие его бригады пытаются выяснить и устранить возникшие трудности. После этого процесс продолжается.

Конечно, остановка ТП и связанные с ним задержки мало кому приятны. Зато так резко снижается вероятность пропуска на следующую операцию заведомо бракованных деталей или изделий, что приближает к реализации принципа бездефектности.

Случайный отказ оборудования может поставить производство на грань катастрофы, поэтому резко возрастает роль ухода за оборудованием: его наладка, профилактика, плановые ремонты, штатная эксплуатация, наконец, просто поддержание чистоты на рабочем месте.

Если на некоторых рабочих местах сигнал об остановке производства загорается чаще, чем на других, то это означает, что в процессе обнаружилось узкое место. "Расширение" узких мест – непрерывное условие совершенствования ТП. Только как этого добиться? Можно было бы привлечь к анализу проблемы инженерные службы предприятия. Но на крупном производстве с большим числом производственных участков это просто нереально: сил на всех не хватит.

Для решения этой проблемы появляется мысль о кружках качества. Дело в том, что именно рабочие непосредственно на своих местах располагают максимумом информации о реальном положении вещей. А кружок качества – прекрасная форма организации досуга групп друзей-единомышленников, кровно заинтересованных в совершенствовании своего дела. Тем более, что этот процесс безграничен.

Японская концепция "кружков качества" основывается на том, что рабочие сами должны знать, анализировать и решать проблемы качества. Две трети времени работы кружка занимает учеба, остальное время – решение конкретных проблем.

Основная задача – поиск, изучение и решение практических вопросов по уменьшению брака: совершенствование ТП, модернизация оборудования, снижение издержек производства и улучшение организации труда. Благодаря организации "кружков качества" предпринимателям удалось привлечь широкую массу рабочих к деятельности по обеспечению качества выпускаемой продукции. Как пра-

вило, результатом создания "кружков качества" является рост производительности труда и качества продукции через 4 – 6 месяцев после начала работы кружка.

Не менее важно при этом повышение образовательного уровня и квалификации персонала, улучшение морального климата на производстве, повышение активности рабочих, рост престижа фирмы на рынке за счет улучшения качества ее продукции.

Японцы при организации рабочих мест и системы обучения воспитывают в работниках культуру гордости за свою работу; работа их ориентирована на сплоченность бригад, на заинтересованность в восприятии опыта от других предприятий, работающих в этой же отрасли.

Немаловажным является то обстоятельство, что большинство рабочих японской фирмы трудятся на одном месте всю жизнь. Такое стабильное закрепление рабочей силы является фактором повышения качества продукции.

На японских фирмах нередко применяются такие формы поощрения рабочего за активную работу в кружках качества, как предоставление ему удобной стоянки для автомобиля, показ его деятельности по телевидению, публикация очерка о нем в газете и даже возможность пообедать с президентом фирмы.

В выпуске изделий высокого качества важную роль играют также взаимоотношения между потребителями и изготовителями, существующие в Японии. Заказчики проявляют больше внимание к результатам деятельности своих поставщиков, постоянно контролируя качество изделий, получаемых для применения в своей РЭА. Заказчики следят за результатами приемочных испытаний, за отходами, происшедшими при сборке и эксплуатации собственных систем. Данные по изделиям разных поставщиков сравниваются и анализируются.

Большинство японских фирм, изготавливающих полупроводниковые изделия, являются также крупными изготовителями аппаратуры и систем, выполненных на этих изделиях, что облегчает получение информации о качестве и надежности этих изделий.

Таким образом, работа над повышением качества изделий – это не какая-то особая сфера (под-система) деятельности японских фирм. Это важнейшая задача каждого работающего. И не на словах, а на деле. Суть японского подхода к обеспечению качества продукции и услуг заключается в следующем. Производство продукции и контроль за ее качеством не должны разделяться и тем более противопоставляться друг другу. Ни ужесточение проверки, ни предоставление контролерам независимого статуса сами по себе не гарантируют отсутствия дефектов. А именно отсутствия дефектов необходимо добиваться при организации и собственно в производстве продукции. Причем следует контролировать качество не конечного продукта, а на каждой стадии его проектирования и изготовления, т.е. по всему жизненному циклу. Контролируя качество, надо ставить перед собой задачу не наказания бракодела, а выявления причин, порождающих брак, и их последовательного устранения. В такой непрерывный поиск должны быть вовлечены сами участники производства – каждый на своем участке. Вот такую работу и должен организовать руководитель.

Японцы поняли раньше многих, что высокое качество не только является важным фактором сбыта и снижения издержек, но и способствует росту производительности труда. Сокращение брака, по их мнению, равносильно расширению сбыта товаров, произведенных при неизменном числе занятых, при уменьшении необходимого контроля, доделок и складских помещений. Оно усиливает чувство гордости рабочих и служащих за свои достижения. По оценкам американских экспертов, снижение доли брака на 2 % вызывает рост производительности труда на 10 %.

Общий подход к методам повышения качества продукции, существующий в Японии, можно обобщить следующим образом:

1. Учет принципа выходящего потока – чем дальше от начала конвейера, тем ниже качество продукции.
2. Обеспечение принципа: коллега по следующей операции – твой покупатель.
3. Воспитание личной ответственности за качество работы, так как ни инструкция, ни приказ не могут гарантировать качество работы.

4. Ошибка при работе на конвейере второй раз не должна повториться. Если повторяется ошибка, конвейер останавливается.

5. Развитие творческого потенциала под лозунгом: "Нормальный человек плохо не работает, плохо работать стыдно".

6. Качество и спешка несовместимы.

Разработка и особенно внедрение такой системы качества занимает суммарно от 5 до 7 лет.

#### **4.3. Подход к системе повышения качества на американских предприятиях**

Уже в 1980 г. любая американская фирма, работающая в области высокоразвитой и сложной технологии, какой является и технология получения полупроводниковых изделий, без программы обеспечения качества рисковала быть сметенной изделиями зарубежного производства, главным образом японскими, имеющими к этому времени постоянно высокое качество.

Соотношение качества японских и американских ИС, оцененное к началу 1983 г. как 6 : 1, почти выровнялось.

В процессе ликвидации разрыва по качеству ИС изготовители в США выработали новые методологические принципы, состоящие из повышения внимания к нуждам заказчика, укрепления более тесных и деловых связей между поставщиками и заказчиками, увеличения доли участия поставщика ИС в циклах проектирования систем потребителем и создания общих баз данных по качеству и надежности.

В США считается, что каждая фирма в вопросе организации работ по обеспечению высокого качества изделий должна сформировать свою техническую политику, т.к., по их мнению, заимствование со стороны пользы не приносит.

Широко используемый в США при производстве ИЭТ военного назначения подход, основанный на "жесткой и прямолинейной" отбраковке и испытаниях на принудительный отказ и ориентированный на выпуск относительно небольших партий изделий, не может быть распространен на массовый выпуск ИЭТ высокого качества.

Поиски подхода фирм к выпуску массовых полупроводниковых изделий привели к обоснованию концепции "нулевого уровня дефектов", а также к концепции "бесплатного качества", которые и стали реализовываться многими формами электронной промышленности. Последняя названа так по ее цели, когда расходы по обеспечению качества меньше, чем потери, к которым приведет брак.

При производстве с "нулем дефектов" предполагается, что ни один работник, ни одна автоматическая или иная система не могут допустить появление или пропуск дефекта, случайного или маловероятного, или из-за забывчивости, или из-за случайной неосторожности. Этот принцип предполагает устранение случайностей, в том числе из-за недостаточной тренированности, недисциплинированности и других случайных причин появления дефектов, и наличие абсолютной системы контроля. Опыт работы показывает, что более половины дефектов изделий, обнаруживаемых в процессе производства, имеет причиной именно эти случайные явления. Принцип "нулевого уровня" предполагает такую систему производства, которая позволяет обнаруживать дефекты, находить причины появления этих дефектов и устранять возможность повторения таких дефектов в будущем.

Данная система в принципе состоит из трех элементов: обнаружение дефекта, его устранение и ведение процесса регулирования способов и средств производства для предупреждения появления данного дефекта в дальнейшем. Методы регулирования, задаваемые процессом "нулевого дефекта", должны быть основательными, т.е. они должны существенно совершенствовать производство, чтобы наверняка предупредить появление дефектов в будущем.

Важен принцип, состоящий в том, что основательно рассматриваются причины дефектов и организовывается производственный процесс так, чтобы дефекты не могли повторяться даже при невнимательности или усталости рабочих, при поломке инструмента, при дефектах в материалах и др.

Американские изготовители ППИ поставили следующую цель: обеспечить как само собой разумеющееся такое высокое качество изделий, чтобы после получения их сразу можно было монтировать в аппаратуру. Входной контроль поступающих от изготовителей изделий должен в конечном итоге отойти в прошлое. Для этого уровень качества изделий должен характеризоваться единицами отказов на миллион поставленных.

Кроме того, как считают американские фирмы, необходимо получение результатов с резким, а не постепенным улучшением качества. При этом упор делается на методологию, которая расширяет борьбу за повышение качества, распространяя ее за пределы самого изделия. Руководители и специалисты в этой области называют это "тотальным управлением качеством" (ТУК).

Философия ТУК возникла в США, была опробована в 30-х годах на некоторых предприятиях и имела успех на практике, но затем была забыта. Успехи японской промышленности после второй мировой войны в значительной степени были обязаны применению идей ТУК. Идеи ТУК, в принципе, состоят в том, чтобы непрерывно совершенствовать организацию производства и конструкцию изделий, их качество, эффективность производства и работы всего предприятия. В идеях ТУК в принципе нет ничего нового. Общеизвестные принципы и идеи приведены в систему и проводятся непрерывно при жестком соблюдении дисциплины. Философия ТУК требует участия в работах каждого члена коллектива. Без участия каждого система ТУК невозможна, именно поэтому здесь требуется новая структура организации работы предприятия. ТУК не может быть реализована кратковременными изменениями; это – неоднократно достигнутая цель; это – процесс непрерывных совершенствований, непрерывного улучшения организации, непрерывного совершенствования качества работы. Каждое, даже мелкое усовершенствование устанавливает новые цели, ставит новые задачи.

В раннем периоде развития система обеспечения качества была в значительной степени обособлена от основной производственной деятельности, действовала самостоятельно, контролировала результаты производственной деятельности, браковала некачественные изделия, сообщала об этом производству. Обеспечение качества было реактивной функцией, оно шло по следам производства,

не опережая его. Корректирующие функции были не в обязанностях службы обеспечения качества и ее персонала.

В современной организации производства положение службы качества, ее обязанности совершенно изменились, изменились и функции ряда других служб предприятий в отношении качества. Политика обеспечения качества становится в основу деятельности предприятий, управление предприятием должно быть направлено на обеспечение качества, весь персонал предприятия должен обучаться и тренироваться в способах достижения высочайшего качества, должны быть созданы из сотрудников предприятия, работающих на разных стадиях производственного процесса, бригады по совершенствованию качества. Тотальное управление качеством должно быть заботой всего коллектива предприятия; в тех случаях, когда этого не удается достичь, эффект получается заметно меньшим, недостаточным.

Служба контроля качеством должна становиться штабом, который планирует, руководит распределением работ, контролирует их результаты, составляет направленные на перспективу задания на работы по совершенствованию качества.

В будущем работа всех фирм должна быть поставлена так, что качество должно быть первой задачей всех подразделений и служб предприятия. Управление, планирование качества должны быть наиболее важной частью работ. Предупреждение ухудшенного качества, а не определение изделий с плохим качеством следует принять за основной вид работ. Время должно тратиться на предупредительные работы в значительно большей степени, чем на фиксирование плохого качества. Вместо реактивного контроля качества должен стать прогнозирующим, предупредительным.

Система ТУК задает непреодолимый и простейший способ управления производством, вместе с тем она фундаментально изменяет обычно принятую систему работы и принципы руководства производством, изменяет порядок управления производством, делает его естественным. Некоторые руководители производства считают, что можно использовать только некоторые принципы системы ТУК, не используя остальные в своей системе, полагая, что они используют те принципы, кото-

рые наиболее выгодны для их предприятия. Это неверно в своей основе. Система ТУК является целостной, все ее принципы связаны и только в сумме дают окончательный эффект.

ТУК охватывает и дополняет все другие уже действующие программы, направленные на повышение качества продукции. Наряду с гарантией качества они предусматривают поставки точно по графику, комплексную автоматизацию производства, проектирование с учетом высокоуправляемого производства. Другими словами, эта концепция основана на том, чтобы каждый на своем рабочем месте в любом подразделении фирмы играл определенную роль в деле улучшения производства, направленную на повышение качества выпускаемых изделий. Основная цель состоит в том, чтобы каждый сотрудник осознал, что ТУК требует постоянных усилий. Идеологи этой методологии выделяют четыре основных принципа, которые должны быть положены в основу любой эффективной программы:

- показать необходимость безошибочной работы, это не призыв не делать ошибки, а призыв устранять их так, чтобы они не появлялись вновь;

- выполнять все требования сменного задания, используя для этого правильно выбранные инструменты, приборы и приспособления и сделав своим девизом постоянство условий работы;

- вместо обычной регистрации появившихся дефектных изделий нужно принимать меры с упреждением, что зависит от расходования средств на поддержание необходимого уровня качества и предотвращение ошибок;

- оценить программу путем установления "стоимости качества".

Для внедрения системы ТУК нужно, чтобы руководители признали качество самым важным фактором успеха на мировом рынке, а затем в его реализации должен участвовать весь штат фирмы, ибо в любом типичном производстве, связанном с высокоразвитой технологией, практическое соприкосновение с самой продукцией имеют лишь около 15 % сотрудников. Но деятельность остальных 85 % столь же существенна, поскольку они участвуют в заказе и получении материалов, комплектующих, оценке их качества, обеспечении надежности работы оборудования, качестве энергоносителей.

лей и т.д. Система ТУК вводилась в течение нескольких лет, постепенно развиваясь и совершенствуясь.

ТУК представляет собрание ведущих принципов организации улучшения качества разработки и производства, мобилизации и количественной оценки возможной мобилизации людских ресурсов, подчиненных этой цели, способов обслуживания, обеспечивающих максимальную надежность и качество изделий. ТУК интегрирует в себе фундаментальные принципы организации работ, обеспечивающих улучшение качества. Стратегия ТУК сводится к достижению нескольких принципиальных целей:

- одновременное улучшение технических характеристик изделия при уменьшении длительности цикла производства и затрат на производство;

- понимание качества как наличие определенного уровня качества предпочтительнее, чем полное отсутствие дефектов;

- фокусирование внимания на предупреждении дефектов и недостатков, а не на отыскании и фиксации недостатков и дефектов;

- создание такой рабочей обстановки, в которой все работники стремятся к непрерывным улучшениям в той области, в которой они работают;

- организация такого порядка и практики работ, при которых ожидаются и получаются новые, более совершенные характеристики и результаты день за днем;

- обеспечение такого партнерства поставщик – заказчик, при котором все стремятся к совершенствованию характеристик изделий.

Принцип ТУК предполагает такую систему организации производства, при которой обнаружение дефекта в изделии должно иметь последствием исследование способа производства, инструмента, исходных материалов и др. с целью обнаружения причины дефекта и устранения возможности повторения таких дефектов в перспективе.

Очень важно, чтобы идеи обеспечения качества, идеи реализации на предприятии системы ТУК были общими для всего предприятия, для всех служб и подразделений. Это резко облегчает проведение групповых работ, упрощает организацию. Следует отметить, что возможны разные варианты организации системы ТУК. Важно только, чтобы работы по совершенствованию качества продукции, эффективности производства, совершенствованию технологического процесса были непрерывными, стали заботой всего коллектива, всех подразделений предприятия. Тогда они будут неизменно иметь успех.

#### **4.4. Отечественные системы бездефектного изготовления продукции**

Этап развития системного, комплексного управления качеством не прошел мимо Советского Союза. Здесь было очень много разных отечественных систем и одна из лучших – система КАНАРСПИ (качество, надежность, ресурс с первых изделий). Многие принципы КАНАРСПИ актуальны и сейчас, особенно к разработке сложных машин и радиоэлектронной аппаратуры. Автором системы был главный инженер Горьковского авиационного завода Т.Ф. Сейфи. Он один из первых понял роль информации и знаний в управлении качеством, перенес акценты обеспечения качества с производства на проектирование, большое значение придавал испытаниям.

В 70-е годы в нашей стране получила широкое развитие система бездефектного изготовления продукции сначала на предприятиях города Саратова, а затем практически на всех предприятиях страны, что позволило резко повысить качество и надежность выпускаемой продукции в стране, в том числе и изделий электронной промышленности.

Система бездефектного изготовления продукции и сдачи ее с первого предъявления исходит из простой и понятной истины, что качество конечной продукции зависит от работы всех производственных звеньев, каждого рабочего. Для изготовления качественной продукции в точном соответствии с требованиями стандартов и технических условий необходимо обеспечить высококачественное

выполнение каждой операции: от контроля монокристаллических слитков до выпуска годных изделий.

На многих предприятиях процессы изготовления продукции и контроль ее качества часто были искусственно разорваны. Считалось, что обязанность рабочих – выполнять намеченные производственные операции, а проверка качества – дело контролеров отдела технического контроля. Контролеры пропускали детали на следующие технологические операции, или браковали их, или возвращали на исправление. В последнем случае контролер оформлял "ведомость дефектов", чтобы потом можно было проверить, как они устранены. Для их устранения на предприятиях порой были вынуждены выделять дополнительные группы рабочих и контролеров.

В условиях системы бездефектного изготовления продукции функции работников ОТК изменяются. Их главной задачей становится не отделение годной продукции от бракованной, не регистрация дефектов, а контроль за нормальным ходом производства, за безусловным соблюдением каждым работником заданного технологического процесса и принятие своевременных мер для предотвращения возможных ошибок.

Система бездефектного изготовления продукции и сдачи ее с первого предъявления предусматривает правило, не допускающее исключений: исполнитель предъявляет ОТК работу только после того, как сам убедится в отсутствии дефектов. Для этого он обязан проверить, полностью ли изготовленные изделия отвечают действующим ТУ. Предъявление изделий с отклонением от требований НТД рассматривается как попытка сдачи недоброкачественной продукции. При обнаружении на первом же изделии отличий от требований документации вся партия возвращается на доработку.

На предприятии регулярно, раз в неделю, проводятся дни "качества". На них подробно анализируют показатели, характеризующие общее состояние и уровень качества изготовления продукции в цехах и по заводу в целом.

Важнейшие из них таковы:

возвраты продукции других цехов (количество деталей, узлов, изделий или партий отстраненных от приемки после обнаружения первого дефекта);  
возвраты продукции с контрольных постов ОТК внутри цехов (количество возвращенных узлов, деталей или партий);  
выполнение ежемесячных планов организационно – технических мероприятий, направленных на повышение качества;  
состояние культуры производства (в баллах);  
брак изделий в процентах к общему выпуску;  
количество полученных от потребителей рекламаций и их причины.

Выводы и предложения, сделанные на еженедельном "дне качества", и принятые решения берутся под особый контроль ОТК. На их основе разрабатываются заводские и цеховые планы по повышению качества продукции, где указываются точные сроки проведения мероприятий и ответственные за это лица. "Дни качества" проводятся также в цехах и подразделениях завода.

Действенность системы усиливается мерами морального и материального стимулирования. Чем выше и стабильнее качество сдаваемой продукции, тем выше материальное вознаграждение.

В последние годы по примеру передовых по качеству западных и японских фирм в стране приступили к осуществлению внедрения систем стандартов ИСО серии 9000.

#### **4.5. Организация службы обеспечения качества**

Служба обеспечения качества организуется в виде нескольких взаимодействующих подразделений. К задачам службы относятся оценки качества, проверка соответствия требованиям, статистический контроль, выявление и оповещение об отклонениях от требований и контроль эксплуатационных характеристик изделий.

Отдельные виды работ организованы в следующем составе.

*Планирование мероприятий* по обеспечению качества продукции: инструкции, контроль производства, различные виды специальных анализов, защита материалов и изделий, анализ условий и потребителей и эксплуатационных характеристик изделий.

*Подготовка кадров:* подбор, тренировка, повышение квалификации.

*Регистрация* (обратная связь): инструкции по регистрации, периодическая инспекция, оценка испытаний другими предприятиями, анализ данных о технических характеристиках изделий.

*Экономика* обеспечения качества: профилактика, экспертиза, затраты по внутренним отказам, затраты по внешним отказам.

*Психология* качества: описание, лозунги, рационализаторская работа, специальная подготовка.

*Инструмент и оборудование*, обеспечивающие высокое качество: требования, соответствие протоколу, проверка оборудования и инструмента, оценка состояния перед началом работ, периодический контроль.

*Выявление несоответствий:* прежде всего это относится к показателям выпускаемой продукции.

*Измерения и испытания:* гарантия точности измерений в процессе испытаний и контроля.

*Поставки:* выбор поставщиков, передача требований на поставляемые изделия, входной контроль, характеристика поставщиков.

*Документация:* обеспечение откорректированной производственной документацией, контроль качества, документация на поставки.

Поток информации от потребителя поступает непрерывно, а упомянутая система и соответствующие документы позволяют оперативно вносить в выпускаемую продукцию необходимые изменения.

*Планирование* системы обеспечения качества осуществляется за восемь этапов. На первом этапе первичные требования потребителя оформляются в перечень требований, составляемый на основании различной прямой и косвенной информации: результатов исследования спроса продукции, опросов потребителей и т.п. На втором и третьем этапах производятся преобразования перечня требований в технические характеристики продукции. На четвертом этапе матрица планирования дополняет-

ся отношениями, определяемыми рынком сбыта и конкурентноспособностью продукции. Пятый этап посвящается уточнению документации данными, поступающими с испытаний, а также информацией о продукции конкурентов. На шестом этапе уточняются возможности продажи продукции. Здесь учитывается спрос и прошлый опыт реализации. При работе над седьмым этапом вся имеющаяся информация приводится к характеристикам продукции. На этом этапе планируются технические характеристики, особенности технологии, необходимая оснастка и инструмент. На восьмом этапе документация анализируется с точки зрения полноты и совершенства ее.

Приведенные виды работ службы качества должны реализовываться на различных стадиях выпуска продукции. Необходимо при этом на всех стадиях учитывать затраты, связанные с дополнительными мерами по обеспечению качества с целью контроля экономической эффективности этих мер.

Важным вопросом является организация высшего уровня руководства службы качества. Деятельность высшего руководства распределяется по таким направлениям, как подготовки кадров, мотивация, контроль исполнительных подразделений, отображение информации о способах повышения качества и достижениях в этой области. Третий аспект проблемы руководства состоит в том, чтобы обеспечить выявление и оценку личного вклада руководящего персонала службы качества. При организации этой службы в условиях массового производства необходимо внедрение методов статистического выборочного контроля.

Мероприятия по повышению качества могут быть разделены на обязательные, рекомендуемые и желательные. Выбор стратегии управления качеством с упором на те или иные мероприятия зависит от опыта конкретного производства.

Практические средства обеспечения качества продукции состоят из средств предотвращения снижения качества, оценки качества и средств обнаружения дефектов и восстановления дефектных изделий.

## **Контрольные вопросы**

1. Переход от контроля качества к системе обеспечения качества. Общие положения.
2. Японский метод качественного изготовления продукции.
3. Подход к системе повышения качества на американских предприятиях.
4. Отечественная система бездефектного изготовления продукции.
5. Организация службы обеспечения качества.

### **5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИС В ПРОЦЕССЕ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Процесс изготовления ИС, как правило, делится на три участка: участок формирования структур на пластине, участок сборки и финишный участок, т.е. участок выходного контроля.

Система бездефектного изготовления изделий в большей степени является организационной и не исключает, например, для ИС технических, физико-химических несовершенств технологических операций и процессов. В процессе производства на участке формирования структур на пластине процент выхода годных может колебаться в значительных пределах, что сказывается на колебаниях процента выхода годных как на участке сборки, так и на участке выходного контроля. Поэтому, на наш взгляд, необходимы широкая разработка и применение технологических методов повышения надежности ИС в процессе серийного производства (рис. 5.1.).

#### **5.1. Снижение температуры основных технологических процессов как путь повышения надежности ИС**

Дальнейшее усложнение ИС и переход на субмикронные размеры их элементов настоятельно требуют повышения временной стабильности сложных микрогетерогенных систем, которыми являются современные ИС, и совместимости большого числа составляющих эти системы разнородных материалов, их структуры и свойств. Одним из основных путей повышения временной стабильности и совместимости является снижение температуры и использование нетермической активации основных физико-химических процессов технологии изготовления ИС.

Среди многочисленных способов энергетического воздействия на физико-химическую систему кристалла ИС основное место занимает тепловое воздействие, которое практически используется при проведении всех технологических процессов ИС (кроме фотолитографии и травления).

В процессе химических превращений диссоциируют в основном молекулы, их колебательная энергия превышает энергию химической связи. Поэтому проведение газофазных химических реакций с

нужной скоростью требует нагрева системы до весьма высоких температур, что в свою очередь приводит к загрязнению элементов ИС неконтролируемыми примесями, вызывает размытие геометрии полученных ранее объемов структуры, снижает эффективность и локальность протекания отдельных процессов. Все это приводит к общему снижению временной стабильности многослойной микрогетерогенной системы в целом.

Термический способ воздействия имеет объемный характер, исключая селективность в пространстве, поэтому иные способы энергетического воздействия на систему могут оказаться более эффективными. Например, существенные преимущества дает применение когерентных излучений, обеспечивающих высокую селективность воздействия лишь на отдельные участки или связи системы. Подобное воздействие осуществляется излучением как в УФ-, так и в ИК-области спектра, а также комбинированным воздействием в обеих областях.

Достижимая путем использования таких излучений высокая локальность в пространстве ограничена длиной волны или фокусировкой луча, что, в принципе, при дальнейшем совершенствовании метода может исключать операцию фотолитографии. Для снижения температуры при росте эпитаксиальных слоев кремния из газообразной фазы эффективно двухстадийное проведение процесса: короткая (порядка 30 с) затравочная стадия в диапазоне 1100 – 1200 °С, после чего температура снижается до  $900 \pm 50$  °С.

Наиболее совершенные по строению и содержанию примесей подвижных ионов пленки диоксида кремния получают в диапазоне 1100 – 1200 °С. Однако, если качество пленок не критично, температуру можно снизить до 900 °С, применяя влажный водород, причем минимальная температура окисления может быть достигнута в парах воды.

Предложено множество режимов снижения зарядов оксидов, формируемых при относительно низких температурах: ступенчатый режим окисления и отжига, специальная подготовка подложки

(перекисная отмычка), отжиг в газовом потоке, содержащем добавки хлорирующих реагентов ( $\text{HCl}, \text{Cl}_2$ ) или других соединений, связывающих щелочные ионы.

При относительно высоких давлениях кислорода ( $1,4 \cdot 10^7$  Па) достаточно высокая скорость окисления достигается уже при температуре  $800^\circ\text{C}$ . Еще более эффективное снижение температуры достигается при фотоактивируемом окислении. Например, в газовой системе  $[\text{Ar} + \text{N}_2\text{O} + \text{HF} + \text{H}_2\text{O}]$  пленка  $\text{SiO}_2$  толщиной 300 нм формируется уже при  $35^\circ\text{C}$ .

Всякого рода технологические обработки структур ИС при повышенных температурах неизбежно влекут за собой ухудшение их параметров и снижение надежности. Таким образом, приоритетными могут считаться низкотемпературные методы формирования диэлектрических слоев.

Например, один из важнейших путей повышения качества и надежности КМОП структур – снижение температурного воздействия в процессе их формирования. Это позволит сохранить первоначальные характеристики исходного материала, достичь минимальных геометрических размеров элементов при обеспечении требуемых электрических параметров структуры. Наиболее длительному термическому воздействию подвергается структура при формировании слаболегированных областей р-типа, так называемых р-карманов.

Для оценки температурного воздействия на структуру введено понятие термического эффекта, характеризуемого коэффициентом термического эффекта –  $K_{T\tau}$ , который определяется в виде произведения температуры процесса на время процесса. В этой работе приводится сравнительная характеристика электрических параметров КМОП-структур, полученных двумя вариантами формирования р-карманов: ионно-диффузионным с высоким  $K_{T\tau}$  и ионным процессом в низком  $K_{T\tau}$ . Последний предполагает формирование р-карманов с использованием легирования кремния высокоэнергетическими ионами бора и кратковременного отжига.

Оценка термического воздействия на структуру для двух технологических вариантов изготовления проводилась путем сравнения коэффициента термического эффекта. Для ионно-

диффузионного варианта  $K_{TЭ}$  составляет величину порядка  $2 \cdot 10^5$  °С·ч, для ионного –  $2 \cdot 10^3$  °С·ч. Резкое уменьшение термического эффекта для ионного варианта объясняется сокращением длительности температурной операции разгонки примеси в р-кармане. Это снижает отрицательное воздействие температуры на кремний и дает возможность сохранить качество исходного материала. Так, время жизни неосновных носителей в ионно-диффузионном варианте составляет 0,1 – 0,001 мкс, в ионном варианте – 1 – 3 мкс. Резкое снижение времени жизни неосновных носителей, наблюдаемое после длительной разгонки примеси в р-кармане, связано с неконтролируемыми загрязнениями и термическими дефектами.

Проведенные ускоренные испытания опытных образцов методом температурного старения с приложением положительного смещения на затворе показали очевидное преимущество по надежности КМОП структур, изготовленных по ионному варианту. Прогрессирующий по времени сдвиг  $\Delta U_n$  для ионно-диффузионного варианта проявляется, прежде всего, за счет высоких, длительных температур технологического процесса, способствующих дефектообразованию в МОП структуре. Происходит терморелаксация структурных дефектов поверхностного слоя к границе раздела Si – SiO<sub>2</sub> и деградация SiO<sub>2</sub>. Кроме того, в механизм нестабильности структуры включаются ионы бора, в избытке присутствующие в поверхностном слое кремния. Эти же причины приводят к тому, что характеристика зависимости тока стока от напряжения на затворе отличается от первоначальной.

Можно заключить, что снижение температуры всего комплекса "горячих операций" технологии производства кремниевых ИС ограничивается уровнем 1110 °С; при использовании термодиффузионного легирования этот предел будет снижен до 1000 °С, а в перспективе – до 900 °С при условии замены термодиффузионного легирования на ионное или радиационно-стимулируемую диффузию с последующим отжигом. Таким образом, перспективы "низкотемпературной" технологии связаны с более эффективным применением методов эпитаксии, в частности, локальной, и заменой некоторых

процессов термического окисления и термодиффузионного легирования на более низкотемпературные процессы маскирования и окисного легирования.

Известны различные способы предотвращения или замедления процесса быстрой миграции кремния в алюминий. Прямое решение этой проблемы заключается в полном удалении  $\text{SiO}_2$  из области контактного окна, что позволило бы выполнить вжигание алюминия ниже  $250\text{ }^\circ\text{C}$  вместо практически применяемой температуры  $400 - 550\text{ }^\circ\text{C}$ .

## **5.2. Компенсирующая технология в производстве интегральных схем**

Технологический процесс изготовления полупроводниковых ИС состоит из более ста операций. Каждая технологическая операция необходима для последовательного получения структур ИС и схемы в сборе. Но наряду с необходимым положительным качеством технологическая операция может вносить и отрицательные качества, на устранение которых зачастую направлены последующие технологические операции.

Например, коробление (то есть "холмистость" по пластине) и изгиб (то есть вогнутость или выпуклость пластины по диаметру), появляющиеся при повышенной температуре при различных технологических обработках и влияющие на искажение геометрии структур и ухудшение электрических характеристик ИС, могут быть значительно уменьшены за счет дополнительной операции осаждения компенсирующей пленки на обратной стороне пластины или за счет компенсирующего легирования обратной стороны пластины.

Но известны технологические процессы, где отрицательные влияния технологической операции на процент выхода годных, структуру и электрические параметры компенсируются в процессе проведения данной операции. Например, введение хлорсодержащей добавки в инертную атмосферу на

операции разгонки при двухстадийной диффузии фосфора приводит к уменьшению дефектности структуры и снижению токов утечки изделий.

Технологию, в которой в процессе проведения технологической операции одновременно проводится процесс, направленный на устранение или значительное снижение отрицательных последствий данной операции на изделие, будем называть *компенсирующей* технологией.

Приведем несколько примеров компенсирующей технологии. Наиболее эффективное понижение плотности линейных дефектов в высоколегированных диффузионных областях заключается в снижении напряжений кристаллической решетки полупроводника с помощью дополнительной компенсирующей примеси. Введение дополнительного диффузанта тетрахлорида германия  $\text{GeCl}_4$  в процессе диффузии фосфора из трихлорида фосфора  $\text{PCl}_3$  выполняет функцию значительно снижения плотности линейных дефектов.

Введение хлоросодержащей добавки в окислительную среду обеспечивает наименьший заряд в оксиде кремния и максимально замедляет рост дефектов упаковки.

Для улучшения связи металлизации на основе золота с подложкой зачастую вводят стекловидные примеси (например, окись кадмия), что приводит в дальнейшем к уменьшению усилия на отрыв внутренних выводов от металлизации. Добавление нестекловидных примесей (окись меди) подавляет отрицательное действие стекловидных добавок, что позволяет достичь оптимального результата.

Несомненно, применение компенсирующей технологии направлено в первую очередь на повышение процента выходных годных изделий, что в свою очередь ведет к повышению их надежности.

### 5.3. Метод выравнивающей технологии для повышения надежности выпускаемых партий ППИ

#### 5.3.1. Обоснование метода

В ряде работ, посвященных управляемости технологического процесса, рассматривается связь между анализом дефектов (причинами снижения процента выхода годных) и мерами по устранению этих дефектов (повышением процента выхода годных).

Известно, что с уменьшением процента выхода годных пленочных конденсаторов со 100 до 20 интенсивность отказов увеличивается примерно на два порядка. Наш опыт работы говорит, что действительно надежность партии изделий будет ниже надежности изделий, указанных в ТУ, если процент выхода годных будет на определяющих операциях значительно ниже планового. Аналитически это можно показать следующим образом.

Пусть  $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$  – плановые проценты выхода годных изделий соответственно на технологических операциях 1, 2, 3 ...  $n$ , тогда  $A_{1i}, A_{2i}, A_{3i} \dots A_{ni}$  – фактические проценты выхода годных для  $i$ -й партии изделий.

Если принять, что в процессе производства всего на четырех определяющих технологических операциях контролируется процент выхода годных (контроль годности структур на пластине  $A_1$ , контроль годности изделий после сборки в корпус  $A_2$ , контроль годности изделий после технологических испытаний  $A_3$  и выходной контроль годности изделий  $A_4$ ), то для  $i$ -й партии изделий производственная надежность в соответствии с разделом 2.3 будет равна

$$P_1 = P_{1i} P_{2i} P_{3i} P_{4i}, \quad (5.1)$$

а с учетом того, что

$$P_{ni} = K_{ni} \cdot A_{ni} , \quad (5.2)$$

где  $K_{ni}$  определяет погрешность контрольно-измерительного оборудования, будет иметь следующий вид:

$$P_i = K_{1i} \cdot A_{1i} \cdot K_{2i} \cdot P_{2i} \cdot K_{3i} \cdot P_{3i} \cdot K_{4i} \cdot P_{4i} . \quad (5.3)$$

Для партии изделий с плановым процентом выхода годных на всех операциях эта надежность будет определена как

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 = K_1 \cdot A_1 \cdot K_2 \cdot A_2 \cdot K_3 \cdot A_3 \cdot K_4 \cdot A_4 . \quad (5.4)$$

Если  $A_{1i} < A_1$ ,  $A_{2i} < A_2$ ,  $A_{3i} < A_3$ ,  $A_{4i} < A_4$ , а  $K_1 = K_{1i}$ ,  $K_2 = K_{2i}$ ,  $K_3 = K_{3i}$ ,  $K_4 = K_{4i}$ , то при выпуске изделий надежность  $i$ -й партии будет меньше надежности партии, прошедшей с плановым процентом выхода годных, т.е.  $P_i < P$ .

Если процент выхода годных будет ниже планового даже на одной операции, надежность партии и в этом случае будет ниже надежности, установленной в ТУ. Поэтому очевиден следующий подход к процессу производства с целью получения партий изделий с одинаковой надежностью, не менее установленной в ТУ.

Если процент выхода годных на какой-либо операции  $n$  для  $i$ -й партии будет  $A_{ni} < A_n$ , необходимо после нее ввести дополнительную технологическую операцию (или операции), обеспечивающую надежность этой партии изделий не менее установленной в ТУ. И хотя результирующий процент выхода годных  $B_i$  после введения дополнительных операций может

снизиться (за счет дополнительной отбраковки потенциально ненадежных изделий), т.е.  $B_{ni} < A_{ni}$ , надежность выпускаемой партии составит  $P_{Bi} = P_A$ .

Технологию, в которой устанавливается допустимый односторонний разброс по проценту выхода годных и при фактическом проценте выхода на операции ниже допустимого вводятся дополнительные технологические отбраковочные операции, будем называть *выравнивающей* технологией.

Метод выравнивающей технологии применяют тогда, когда процент выхода годных ниже планового значения на данной операции не более чем на утроенное среднеквадратическое отклонение.

Подтверждением необходимости применения метода выравнивающей технологии могут служить следующие примеры.

Партии ИС серии 106, 134 с меньшим значением процента выхода годных кристаллов на пластине имеют больший процент отказов на отбраковочных испытаниях (табл. 5.1, 5.2).

Это положение иллюстрируется также построенными полями корреляции, отражающими картину взаимосвязи процента выхода годных кристаллов и ИС по статистическим параметрам на операциях контроля электрических параметров после технологических операций и отбраковочных испытаний (рис. 5.2, 5.3).

Таблица 5.1

Результаты отбраковочных испытаний партий ИС серий 106, 134  
с различным процентом выхода годных на пластине

Отбраковочные испытания	Количество отказов, шт/%, в партии
-------------------------	---------------------------------------

Отбраковочные испытания	Количество отказов, шт/%, в партии			
	А	Б	В	Г
Термообработка для стабилизации параметров загерметизированной схемы	1/0,33	0/0	2/1,0	1/0,5
Контроль электрических параметров в нормальных условиях	15/5,0	9/3,0	7/3,5	3/1,5
Циклическое воздействие температуры	1/0,33	0/0	1/0,5	0/0
Контроль электрических параметров при пониженной температуре	6/2,0	3/1,0	8/4,0	4/2,0
Контроль электрических параметров при повышенной температуре	0/0	0/0	6/3,0	3/1,5
Электротермотренировка (ЭТТ)	21/7,0	13/4,33	15/7,5	5/2,5
Итого:	44/14,66	25/8,33	39/19,5	16/8

Здесь партии А, Б, В, Г характеризуются следующими данными:

Партия	Серия ИС	Выход годных кристаллов на пласти-	Количество ИС в партии,
--------	----------	------------------------------------	-------------------------

		не	шт
А	106	35	300
Б	106	44	300
В	134	36	200
Г	134	49	200

Таблица 5.2

Влияние времени ЭТТ на ИС серии 134 с различными процентами выхода годных на пластине

Время ЭТТ, ч	Количество отказов в партии, шт.	
	В	Г
24	8	3
48	4	2
96	2	0
168	1	0
240	0	0
500	1	0

Итого:	16	5
--------	----	---

При этом наблюдаются следующие закономерности. С одной стороны, при увеличении процента выхода годных кристаллов в процессе их изготовления выход годных ИС после сборки и отбраковочных испытаний также увеличивается, а уровень отказов, например, по статистическим параметрам уменьшается (рис.5.2). С другой стороны, рост уровня дефектов до отбраковочных испытаний, например, по статистическим параметрам перед ЭТТ, приводит к увеличению процента забракования по данному виду дефектов в процессе отбраковочных испытаний (рис. 5.3).

Эксперименты показали также, что влияние выхода годных кристаллов на пластине на качество ИС в партии проявляется на ЭТТ и оказывается тем сильнее, чем больше продолжительность ЭТТ (табл.5.2).

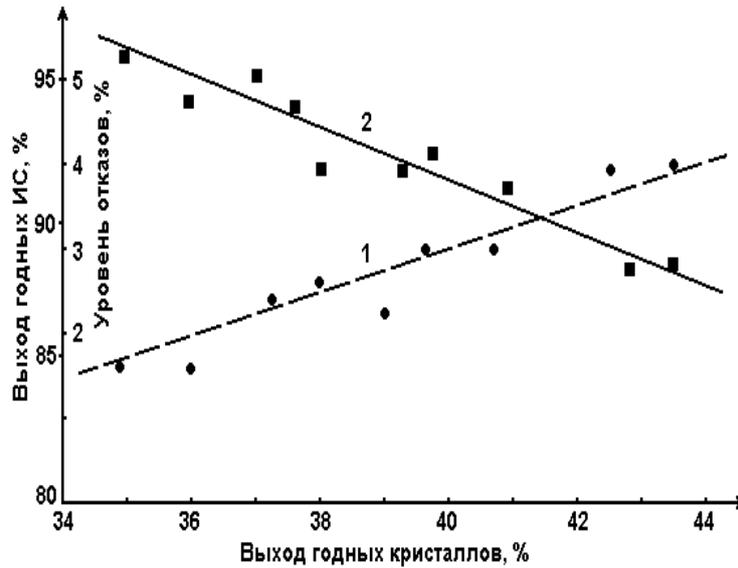


Рис. 5.2. Поле корреляции процента выхода годных кристаллов и ИС серии 106 по статическим параметрам:  
 1 – выход годных ИС; 2 – уровень отказов ИС  
 по статическим параметрам

### **5.3.2. Разработка метода выравнивающей технологии для серийного производства транзисторов и интегральных схем**

Метод выравнивающей технологии целесообразно применять тогда, когда процент выхода годных ниже планового значения на данной операции более чем на утроенное среднеквадратичное отклонение. С целью выравнивания надежности выпускаемых партий изделий выбор дополнительных технологических отбраковочных операций производится исходя из результатов анализа причин снижения процента выхода годных.

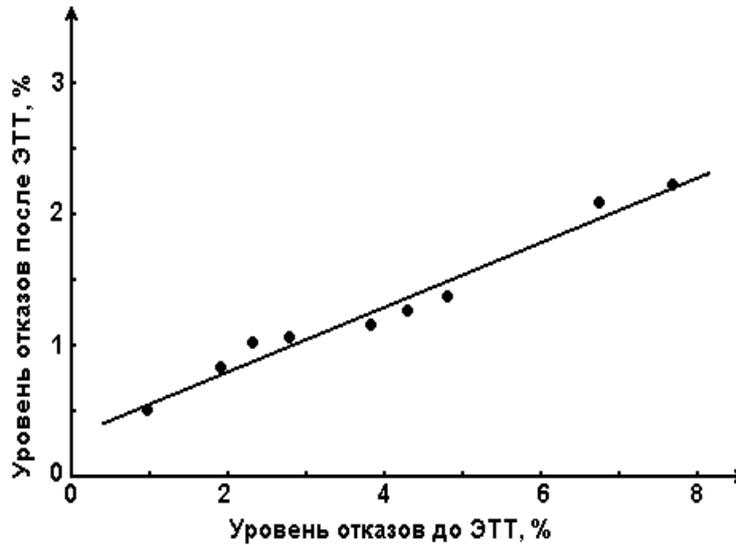


Рис. 5.3. Поле корреляции уровней отказов до и после ЭТТ ИС серии 106

Обозначим через  $A_{0i}$  плановый процент выхода годных на соответствующей операции. Если в текущей партии изделий после проведения одной из указанных контрольных операций окажется, что процент выхода годных ниже, чем значение  $A_i < A_{0i} - 3\sigma_i$ , где  $\sigma_i$  – среднеквадратич-

ное отклонение, то снижается категория качества этой партии. Для случая изготовления изделий широкого применения технологический маршрут с применением выравнивающей технологии показан на рис. 5.4. В сопроводительном листе на партию, в которой  $A_i < A_{0i} - 3\sigma_i$ , технолог после анализа бракованных изделий записывает объем дополнительных испытаний.

На примере выпуска ИС серии 106 проанализируем возможность применения метода выравнивающей технологии.

При анализе 55 технологических сборочных операций выбрано четыре следующие операции, которые являются определяющими для качества и надежности ИС: проверка внешнего вида арматур перед герметизацией (обозначим операцией 1), первая классификация (2), вторая классификация (проверка статистических параметров после проведения ЭТТ (3)), третья классификация (4).

В табл. 5.3 указаны проценты выхода 33 партий ИС серии 106, выбранных методом случайной выборки из 331 партии схем.

Обобщенные данные по указанным партиям представлены в табл. 5.4. В последней графе даны нижние значения процента выхода годных  $A_{Hi}$  для  $i$ -той операции, устанавливаемые при применении метода выравнивающей технологии и определяемые по формуле:

$$A_{Hi} = A_i - 3\sigma_i. \quad (5.5)$$

Просматривая пооперационные проценты выходов по 33 партиям ИС, находим, что партия № 13 на операции (1), партия № 31 на операции (2), партия № 33 на операции (3) и партия № 22 на операции (4) имеют фактические проценты выходов ниже установленного допустимого значения. На рис. 5.5 (распределение Парето) для партии № 13 видно, что основной брак связан с операцией "Приварка внутренних выводов" и составляет 14,12 % из 16,61 % брака. Для обеспечения надежности партии № 13 не ниже надежности партий ИС, прошедших операцию (1) с процентом выхода годных не хуже установленного нижнего значения, ИС этой партии подвергли дополнительным испытаниям "на обдув арматур" и повторному контролю внешнего вида арматур.

В партиях 31, 33, 22 основной вид брака приходился на электрические параметры (нестабильность и выход за нормы технических условий). Для обеспечения надежности этих партий не ниже надежности партий ИС, прошедших операции (2), (3), (4) с процентом выхода не хуже установленного нижнего значения, ИС этих партий подвергли дополнительным испытаниям на воздействие смены

температур (10 термоциклов  $-60\text{ }^{\circ}\text{C} - +125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), электротренировке (96 ч в динамическом режиме при  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и проверке электрических параметров.

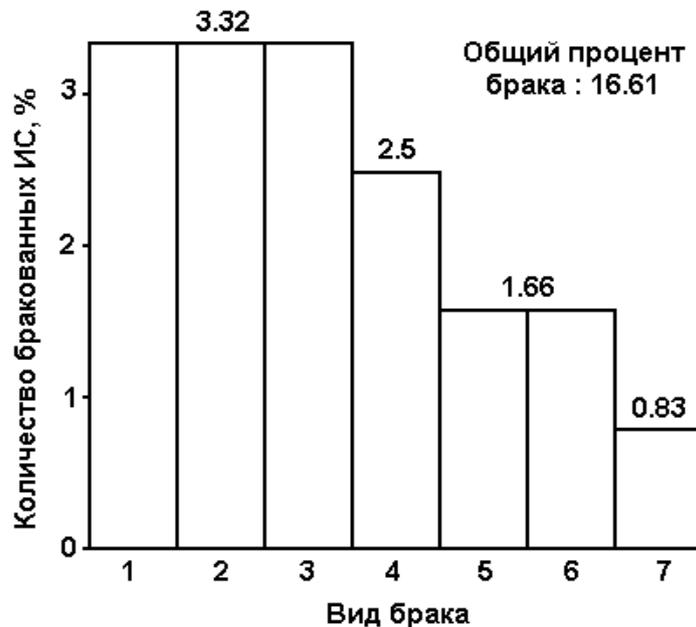


Рис. 5.5. Гистограмма распределения по видам брака партии № 13 на операции (1) (распределение Парето):

- 1 – отслоение сварной точки на кристалле;
- 2 – обрыв сварной точки; 3 – смещение сварной точки; 4 – отслоение сварной точки на траверсе;
- 5 – некачественная сварная точка; 6 – загрязнение кристалла; 7 – дефект корпуса

Доля дополнительно отбракованных интегральных схем представлена в табл. 5.5

Подтверждением того, что действительно надежность ИС партий 13, 22, 31, 33 после применения метода выравнивающей технологии не хуже надежности остальных партий, являются результаты следующего эксперимента, суть которого представлена в табл. 5.6.

Таблица 5.5

Результаты дополнительных испытаний партий ИС

Опера-ция	Номер партии	Состав дополнитель-ных испытаний	Доля дополни-тельных отказов ИС, %
(1)	13	Испытания на обдув арматур, контроль	0,39

		внешнего вида	
(2)	31	Термоциклирование, электротермотренировка	3,81
(3)	33	Термоциклирование, электротермотренировка	0,74
(4)	22	Термоциклирование, электротермотренировка	1,23

Каждая партия интегральных схем, испытываемая на надежность, состояла из 50 схем. В сборную партию отобраны методом случайного выбора по 1 – 2 схемы от каждой партии (кроме партий 13, 22, 31, 33). В связи с тем, что отказов по нормам ТУ при испытаниях в течение 1500 ч не наблюдалось, отказы в табл. 5.5 представлены условно по параметру выходного напряжения логического нуля больше величины 0,2 В (вместо значения 0,3 В по ТУ).

Результаты испытаний на надежность по сравниваемым партиям

Таблица 5.6

Номер партии	Количество отказов ИС при испытаниях на надежность при температуре +125 °С		
	500 ч	1000 ч	1500 ч
13 (текущая)	1	1	–
13 (после дополнительных испытаний)	–	–	1
22 (текущая)	–	–	2
22 (после дополнительных испытаний)	–	–	–
31(текущая)	–	2	1
31 (после дополнительных испытаний)	–	–	1
33 (текущая)	–	1	1
33 (после дополнительных испытаний)	–	–	1
Сборная (текущая)	–	–	1

#### 5.4. Совершенствование технологических процессов, обеспечивающих надежность БИС

Исторически цикл разработки сверхбольших интегральных схем (СБИС) состоит из четырех этапов: определение требований и структуры схемы, конструирование и проверка конструкции, устранение дефектов схемы, оценка надежности. Опыт, накопленный при разработках, а также широкое использование при этом компьютеров позволили существенно сократить этап конструирования и проверки конструкции.

Обеспечение надежности и устранение дефектов схемы стали важнейшими этапами разработки СБИС и занимают больше времени, чем конструирование. Вместе с тем требования современного рынка не позволяют занимать на разработку время более трех лет, как это было раньше. Нужно резко сокращать длительность разработки СБИС, а для этого следует резко сокращать время, необходимое для реализации серийного производства после того, как получен первый работающий образец схемы. На рис. 5.6 показано, какими были сроки разработки раньше, каковы они сейчас и какими они должны быть.



Рис. 5.6. Цикл разработки СБИС:

А – предыдущий период; Б – современное положение;

В – цель (будущее);  $T_1$  – получение первого функционирующего образца;

$T_2$  – окончание квалификации СБИС

Стадия устранения ошибок в разработке и производственном процессе по мере развития методов конструирования становится самой длинной в процессе разработки и запуска в производство современных СБИС.

Развитие конструкций СБИС, уменьшение размеров компонентов увеличивает напряженность электрического поля в схемах, плотность токов в полосках металлизации и усложняет работы по обеспечению надежности и устранению дефектов, возникающих при разработке и постановке производственного процесса. В связи с интенсивным развитием и частыми изменениями технологии производства СБИС становятся крайне важными исследовательские работы по уточнению причин ненадежности схем и методам их устранения. В связи с необходимостью сокращения сроков рыночной готовности СБИС необходимы ускоренные методы испытаний и контрольных проверок надежности, имеющих гарантированную эффективность.

Работы по повышению электрической прочности слоев окисла  $\text{SiO}_2$  в ИС имеют прямое отношение к надежности схем, так как электрический пробой оксидной пленки приводит к отказу ИС. Схемы должны иметь запас электрической прочности, чтобы при случайных нагрузках, повышениях питающего напряжения, случайных пиках, не было опасности электрического пробоя и отказа схемы. Исследованиями, проведенными на предприятиях фирмы Philips, было выяснено, что пробои оксида непосредственно связаны с наличием дефектов в пленке.

Изменение производственного процесса, уменьшение числа посторонних частиц в воздухе чистых комнат, совершенствование фильтров чистых комнат, позволили существенно уменьшить количество дефектов в оксидных пленках. Если начинали производство СБИС с предельными значениями плотностей дефектов 60 – 90 дефектов на  $\text{см}^2$ , то окончили работу со значениями не более 10 дефектов/ $\text{см}^2$ . То есть совершенствование чистоты при проведении производственного процесса позволило резко снизить уровень дефектности ИС, повысить их надежность. Сопоставление результатов, полученных на предприятии Philips, с ведущими предприятиями США и Японии показало, что эти результаты лучше результатов, полученных в США и Японии.

Качество эпитаксиальной структуры определяет выход годных ИС, а уровень эпитаксиальной технологии - возможности и уровень разработок и производства. Производство СБИС невозможно без разработки нового поколения спецтехнологического оборудования, обеспечивающего высокую

прецизионность технологических процессов. Так, например, неравномерность электрофизических параметров сформированных слоев не должна превышать  $\pm 1 - 2 \%$  по площади пластины диаметром 200 – 300 мм, для чего требуется динамический контроль температуры на уровне  $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$  при трех сигма. Эти требования особенно ужесточаются при снижении температуры осаждения эпитаксиальных слоев кремния с 1100 – 1200  $^\circ\text{C}$  до 800 – 900  $^\circ\text{C}$  и ниже.

С уменьшением минимального технологического размера СБИС с особой остротой возникают проблемы планаризации рельефа поверхности кристаллов. Это вызвано объективной взаимосвязью минимального размера СБИС с глубиной фокуса используемого степпера. В настоящее время в процессе разработки технологии изготовления СБИС с субмикронными размерами элементов необходим переход от частичной планаризации к глобальной планаризации. Наиболее перспективным методом обработки рельефных структур СБИС, обеспечивающим глобальную планаризацию, считается метод химико-механического полирования (ХМП).

Весьма важные работы по обеспечению надежности были проведены на ИС в пластмассовых корпусах. Прошло уже много лет с тех пор, как начались весьма интенсивные работы по совершенствованию пластмасс и конструкций ИС в пластмассовых корпусах. Однако, время от времени на ИС с пластмассовыми корпусами возникали непонятные "эпидемии" обрывов внутренних выводов. Причины этого явления были исследованы в лабораториях Philips с помощью нового измерительного прибора – сканирующего акустического томографа (СКАТ). Было выяснено, что причиной обрыва проводников являются появляющиеся при некоторых рецептурах пластмасс и режимах обработки ИС в производстве расслоения между пластмассой и подложкой. В результате этого появляются большие усилия, растягивающие внутренние выводы и нередко отрывающие их от контактных площадок, вследствие чего схемы отказывают.

В областях, где наблюдалось отслоение пластмассы от подложки в результате проведения 500 термоциклов, прочность крепления резко понижалась, иногда до нуля (обрыв), а чаще всего до ни-

чтожной величины, меньше 1 г, тогда как в областях, где не наблюдалось расслоения, прочность заметно превышала 10 г. Результаты исследований причин расслоения и выбор рецептов пластмасс и режимов обработки корпусов, устранили расслоение и позволили заметно повысить надежность ИС.

Новые тенденции работ по обеспечению надежности в значительной степени связаны с усложнением технологии производства ИС. Уменьшение основных размеров компонентов и увеличение количества компонентов на кристалле, переход от обычных ИС к БИС и СБИС, потребовали введения новых технологий производства, новых усилий в обеспечении надежности, совершенствования методов анализа отказов и дефектов, методов моделирования, контроля за производственным процессами.

### **Контрольные вопросы**

1. Схема защиты технологических методов повышения надежности ИС в процессе серийного производства.
2. Снижение температуры основных технологических процессов как путь повышения надежности ИС.
3. Компенсирующая технология в производстве ИС.
4. Метод выравнивающей технологии для повышения надежности выпускаемых партий ППИ. Обоснование метода.
5. Технологический маршрут изготовления ИС при применении метода выравнивающей технологии.
6. Совершенствование технологических процессов, обеспечивающих надежность БИС.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Явно неудовлетворенные характеристиками закупаемых изделий Министерство обороны США, ежегодно тратя 5 млрд долл. на обслуживание электронного оборудования, разработало целую серию испытательных операций для всех этапов производства и сборки полупроводниковых изделий, что в конечном счете приводит к более широкой автоматизации производственных процессов, что, в свою очередь, повышает выход годных, снижает стоимость и повышает надежность выпускаемых изделий.

Эти работы выполнялись в соответствии с разработанной программой "Улучшение надежности, производства и сборки ИС". Целью программы ставилось создание "хорошо документированной методики производственных процессов, управления и измерений для использования на производственных линиях применительно к промышленности полупроводниковых изделий в целом". В программе намечалось множество проблем, охватывающих широкий диапазон от производства изделий до их сборки, в том числе следующие:

*Кремний.* Проблемы измерения толщины и сопротивления тонких эпитаксиальных слоев, определения профилей примесей и разработка средств для быстрой проверки пластин на загрязнения.

*Оксиды.* Стандартизация условий для проверки механических напряжений, обусловленных сочетаниями таких параметров как смещение, время и температура, и методов контроля, которые можно применить сразу же после операции травления для того, чтобы обнаружить присутствие оксидов в контактных окнах.

*Фотолитография.* Проблемы проверки фотомасок и, в первую очередь, проверки стеклянных масок с целью обнаружения дефектов и точности выдерживания размеров.

*Сборка.* Ликвидация трудностей с приваркой выводов, с заключением в корпус, герметизацией. При приваривании проволочных выводов необходимы 100 %-ные испытания с тем, чтобы исключить возможность плохих соединений. Хотя Министерство обороны хочет иметь высоконадежные корпуса, еще никто не знает, как определить их надежность, не говоря уже о том, как ее проверить. При герметизации серьезной проблемой остается определение скорости утечки.

*Испытания.* Среди нерешенных проблем, возникающих при измерениях на стадии производства, можно назвать быстрые испытания на производственных линиях с целью определения примесей в кислотах, растворах и легирующих веществах, контроль процессов ионного легирования и чистоты поверхности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов В.Е., Захаров В.П., Коробов А.И. Системы технологического обеспечения качества компонентов микроэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1987. 157 с.
2. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Бордюжа О.Л. Обеспечение и повышение надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем в процессе серийного производства. Минск: Интеграл, 1997. 390 с.
3. Горлов М.И., Королев С.Ю. Физические основы надежности интегральных микросхем. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1995. 200 с.
4. Как работают Японские предприятия: Сокр. пер. с англ. / Под ред. Я. Мондена, Р. Сибанавы, С. Такаянаги, Т. Нагао. М.: Экономика, 1989. 230 с.

5. Месяцев П.П. Надежность производства электронно-вычислительных машин. М.: Машгиз, 1963. 216 с.
6. Системы качества. Сборник нормативно-методических документов. М.: Госстандарт, 1989.
7. Смирнов Н.И., Широков В.Б. Оценка безотказности интегральных микросхем. М.: Радио и связь, 1983. 111 с.
8. Статистические методы повышения качества: Пер. с англ. / Под ред. Хитоси Куше. М.: Финансы и статистика, 1990. 301 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Качество и надежность полупроводниковых изделий	6
1.1. Качество изделий	6
1.2. Надежность изделий	12
1.3. Конструктивно-технологические особенности ИС, влияющие на их надежность	15
2. Требования к технологическому процессу для выпуска изделий высокой надежности	26
2.1. Оценка технологического процесса	26
2.2. Применяемые показатели оценки технологической операции	38
2.3. Надежность контрольных операций	42
2.4. Управляемость и стабильность технологического процесса	45
2.5. Организационно-технические мероприятия по обеспечению заданной надежности при производстве изделий	52
2.6. Требования по обеспечению и контролю качества интегральных схем в процессе производства	59
Контрольные вопросы	62
3. Статистические методы управления качеством в производстве интегральных схем	63
3.1. Анализ технологических процессов и применение для этой цели качественных диаграмм	66
3.1.1. Метод построения диаграмм причин и ре-	

зультатов	67
<b>3.1.2. Метод выделения наиболее важных факторов, влияющих на качество изделий</b>	72
3.1.3. Точность технологической операции (процесса)	78
3.2. Статистическое регулирование технологических процессов	81
3.3. Система контроля технологического процесса	87
3.3.1. Контроль качества изделий в процессе производства	87
3.3.2. Контроль технологического процесса	89
Контрольные вопросы	91
4. Переход от контроля качества к системе обеспечения качества	92
4.1. Общие положения	92
4.2. Японский метод качественного изготовления продукции	95
4.3. Подход к системе повышения качества на американских предприятиях	101
4.4. Отечественные системы бездефектного изготовления продукции	107
4.5. Организация службы обеспечения качества	109
Контрольные вопросы	111
5. Технологические методы повышения надежности ИС	

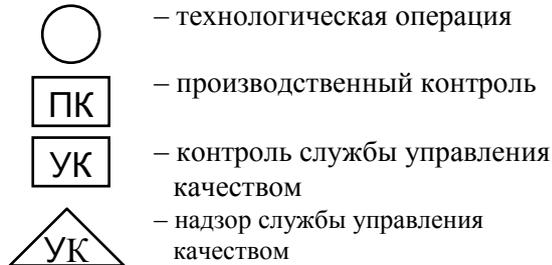
в процессе серийного производства	112
5.1. Снижение температуры основных технологических процессов как путь повышения надежности ИС	112
5.2. Компенсирующая технология в производстве интегральных схем	117
5.3. Метод выравнивающей технологии для повышения надежности выпускаемых партий ППИ	118
5.3.1. Обоснование метода	118
5.3.2. Разработка метода выравнивающей технологии для серийного производства транзисторов и интегральных схем	123
5.4. Совершенствование технологических процессов, обеспечивающих надежность БИС	131
Контрольные вопросы	135
Заключение	136
Приложение 1. Технологическая схема контрольных операций участка формирования структур ИС на пластине	138
Приложение 2. Схема технологического контроля сборочных операций	143
Библиографический список	146



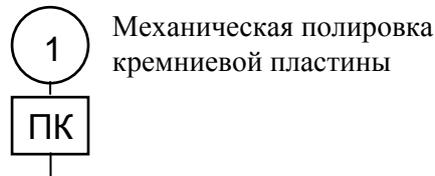
## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА КОНТРОЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ УЧАСТКА ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУР ИС НА ПЛАСТИНЕ

В схеме технологического контроля фирмы Texas Instrument (США), представленной ниже, используются следующие обозначения:



Номера технологических операций даны условно.



100 %-ный контроль  
качества пластин после  
полировки

Используется ( $X_{cp} - R$ )-карта для  
контроля толщины пластин.  
Визуальный контроль  
поверхностных повреждений пла-  
стины: трещины, ямки,  
царапины и др.

Окисление

100 %-ный контроль  
пластин по качеству  
окисления

Визуальный контроль неравно-  
мерности толщины оксида,  
наличия дефектов в оксиде  
(проколов, посторонних вклю-  
чений)

Используется ( $X_{cp} - R$ )-карта для  
контроля диффузионных печей по  
температуре



Надзор за производственным контролем с целью выявления поверхностных дефектов пластин типа: пятна, конденсация паров, загрязнения и др.

Предварительный контроль толщины слоя и удельного сопротивления

Контролируется каждая партия для определения отлаженности технологических операций диффузии, эпитаксии

100 %-ный контроль пластины по качеству диффузии

Проверка производственного контроля

Эпитаксия

Предварительный контроль  
100 %-ный контроль пластин по качеству эпитаксиального слоя  
Приемка партии пластин, прошедших стадию диффузии с последующим эпитаксиальным процессом

## Нанесение фоторезиста

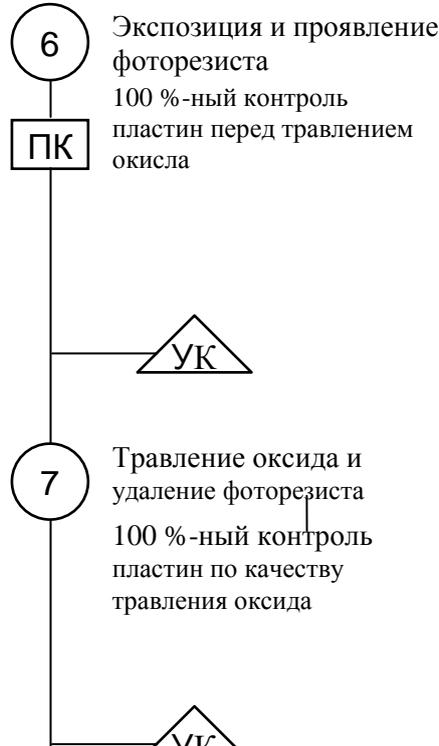
Проверяется качество непрозрачных участков при увеличении 30 крат в отраженном свете. Контролируется резкость черных краев маски и другие параметры

Приемка партии пластин после нанесения фоторезиста

Каждая пластина проверяется после проявления на наличие таких дефектов фоторезиста как загрязнения, царапины, неравномерность толщины и др.

Качество производственного контроля координируется по результатам надзора службы управления качеством

Визуальный контроль для выявления дефектов оксида: подтравливание, неравномерность, неполное удаление



оксида, загрязнение и др.

Производственный контроль  
управляется результатами  
контроля службы управления каче-  
ством

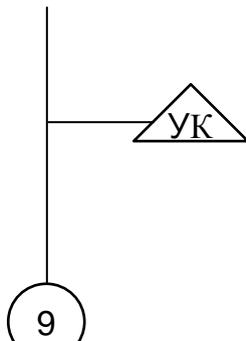
### Напыление металла

Контроль свидетеля для  
определения толщины  
металлизации. Два раза  
в неделю контролируются  
образцы от каждого оператора.  
Калибруется измерительное оборудо-  
вание

Надзор за опе-  
рацией

напыления  
Проверка калибровки  
измерительного  
оборудования  
100 %-ный контроль  
пластин по качеству  
напыленной металлизации

Эффективность 100 %-ного  
производственного контроля  
определяется выборочно один  
раз в смену у каждого  
оператора с целью исключения  
таких дефектов как наличие при-  
месей, посторонних частиц, за-



грязнений и др.

Визуальный контроль таких дефектов как неравномерность, недостаточная или большая экспозиция, дефекты рисунка, отслоение и др.

Производственный контроль находится под надзором службы управления качеством

Визуальный контроль для исключения таких дефектов как неполное удаление металла, наличие контакта металлизации с назащищенным кремнием вне контактных окон, смещение, отклонения и т.п.

Производственный контроль находится под надзором службы управления каче-

Нанесение, экспозиция и проявление фоторезиста

100 %-ный контроль пластин

Травление металла и удаление фоторезиста

100 %-ный контроль пластин по качеству металлизации

ПК

УК

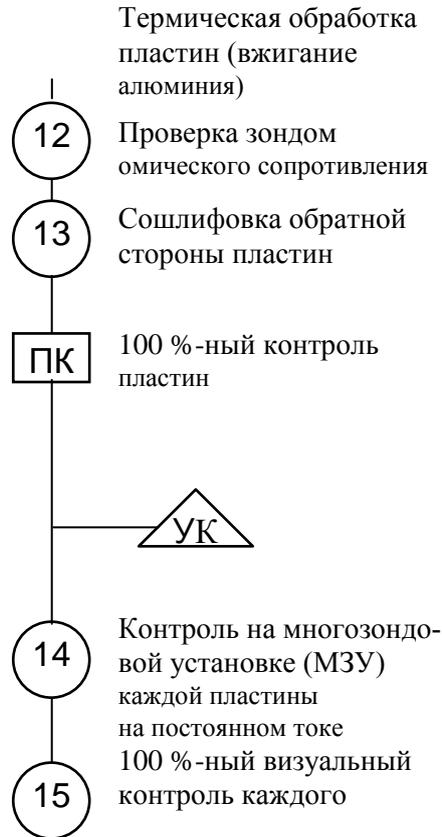
СТВОМ

Проверка толщины пластины и выявление таких дефектов как закорачивание металла, подтравливание, отслаивание и т.п.

Для проверки оборудования и производственных контролеров используются ( $X_{cp} - R$ )-карты при проверке толщины пластин

Автоматическая маркировка негодных кристаллов на пластине

Маркировка негодных по внешнему виду кристаллов



схемы на пластине

кристалла схемы  
на пластине



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Схема технологического контроля

### сборочных операций

Технологическая схема операций сборки ИС приведена на примере отечественных предприятий, используя следующие обозначения:



– технологическая операция;



– производственный контроль



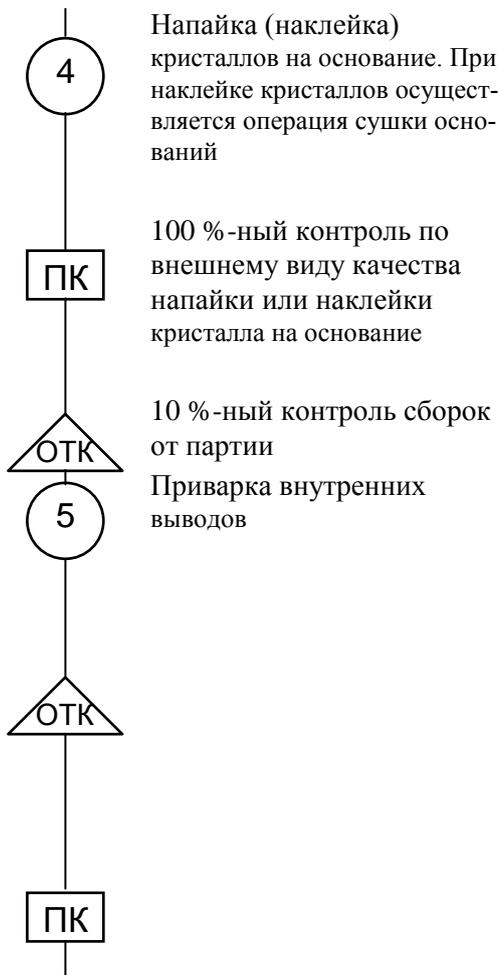
– контроль службы ОТК

Каждый скрайберный станок проверяется 2 раза в смену по качеству исполнения операции  
Визуальный контроль для отделения кристаллов с дефектами скрайбирования, отслаивания металлизации, разрывов проводящих дорожек, трещин кристаллов и т.п.



Контроль правильности ориентации кристалла, отсутствия напыла соединяющего материала на кристалл, наличие припоя на 3/4 периметра кристалла и т.п.

До начала работы и после перерыва (2 раза в смену) проверяется настроенность каждой установки приварки на 2 – 3 сборки по внешнему виду сварки, по усилию на отрыв и наличиею ядра сварки

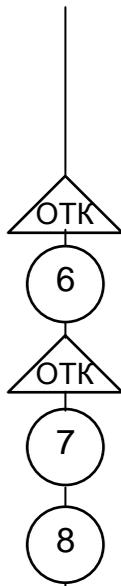


Осмотр всей сборки при увеличении не менее 30 крат на наличие петли, отсутствия касания выводов друг друга и кристаллов

Детальный контроль внешнего состояния сварных точек, состояния поверхности кристалла на отсутствие дефектов (загрязнений, царапин и т.п.) при увеличении не менее 80 крат

100 %-ный контроль по внешнему виду качества приварки (под МБС)

10 %-ный контроль сборок от партии  
100 %-ный контроль внешнего вида состояния поверхности кристалла (под ММУ-3)



10 %-ный контроль сборок от партии  
Термообработка в кислороде  
10 %-ный контроль сборок от партии

48 ч при температуре  
+150 °С

Термообработка

Герметизация

24 ч при температуре  
+125 °С

Термообработка

100 %-ный контроль  
внешнего вида схем

Затем ИС по технологическому маршруту, зависящему от конструкции ИС, проходят операции классификации, отбраковочных испытаний, проверки электрических параметров при нормальных и крайних температурах, проверки герметичности, маркировки, и годные ИС партиями предъявляются в ОТК. Конкретная последовательность маршрута указывается в технологической документации с обязательным соблюдением требований ОТУ.

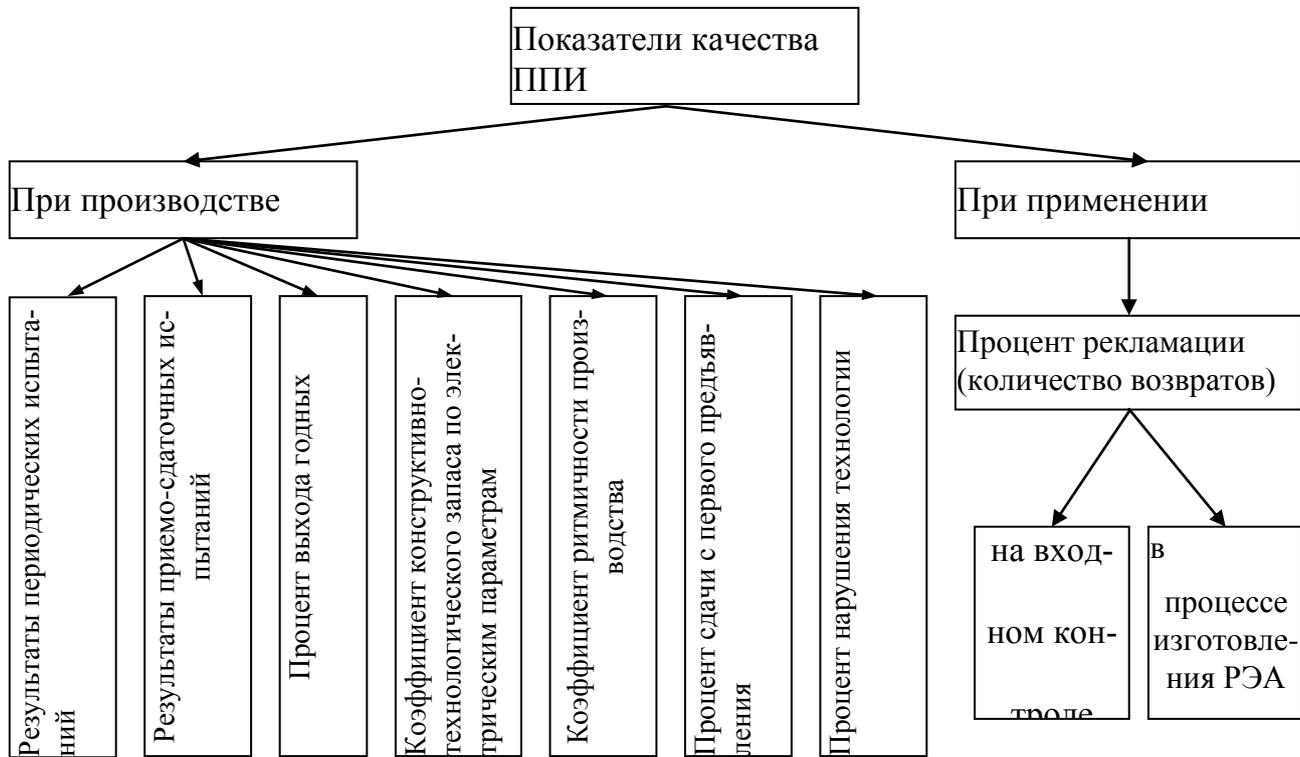


Рис. 1.1. Основные показатели, определяющие качество ИЭТ

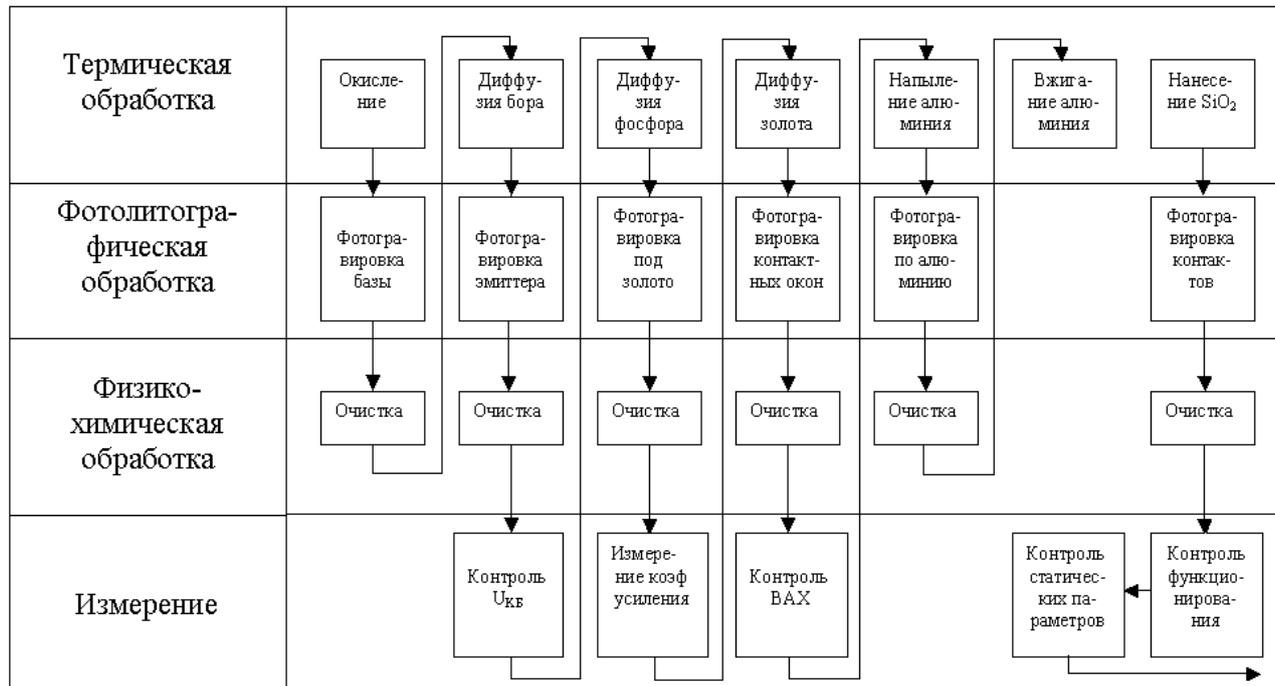


Рис. 1.6. Последовательность при изготовлении ИС на пластинке КСДИ

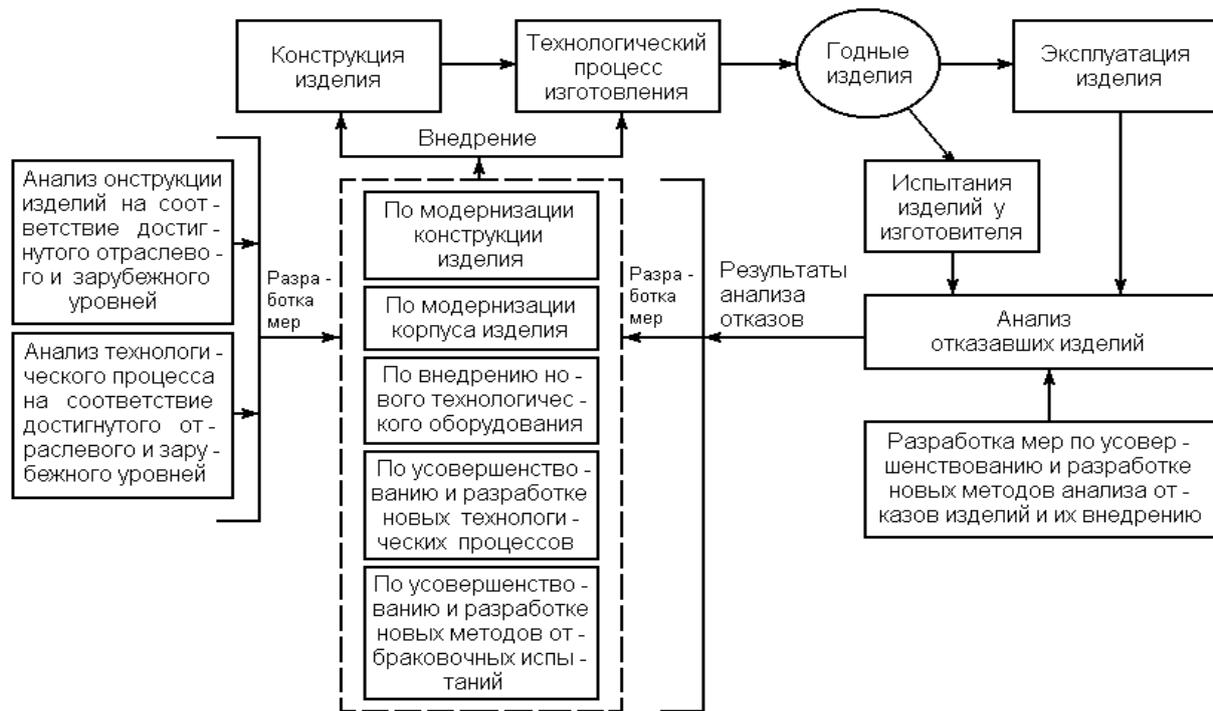
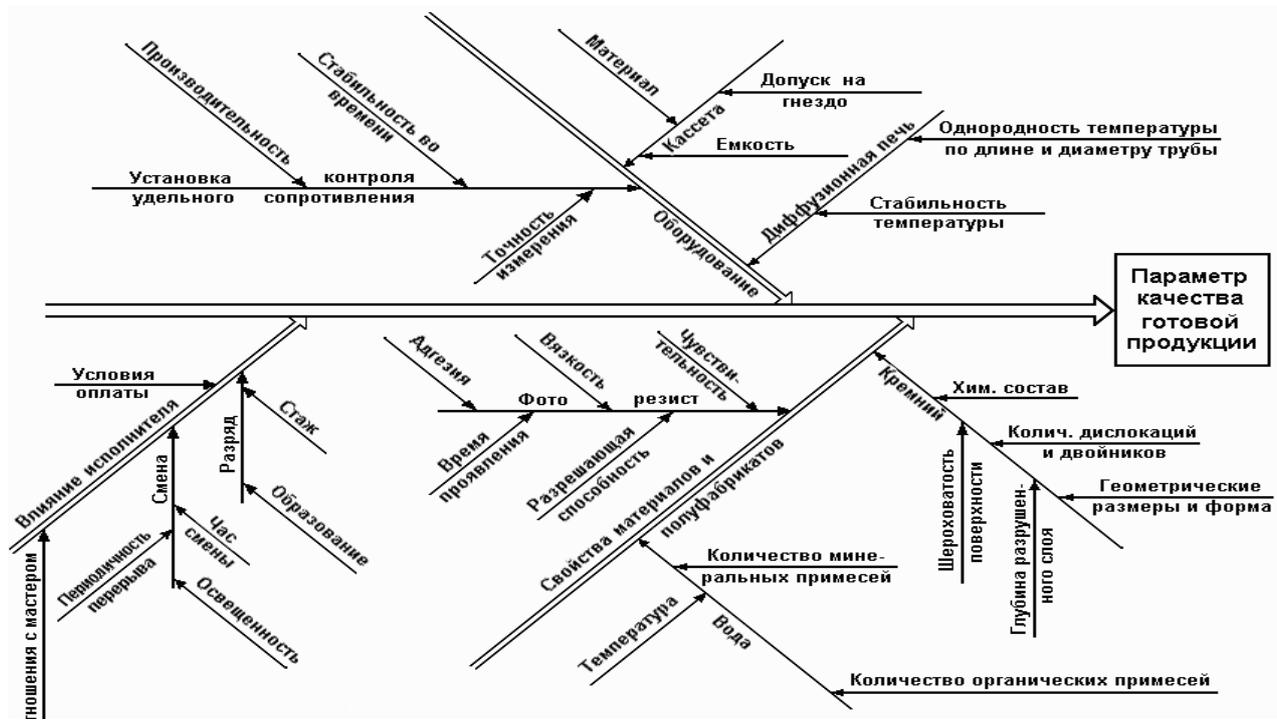
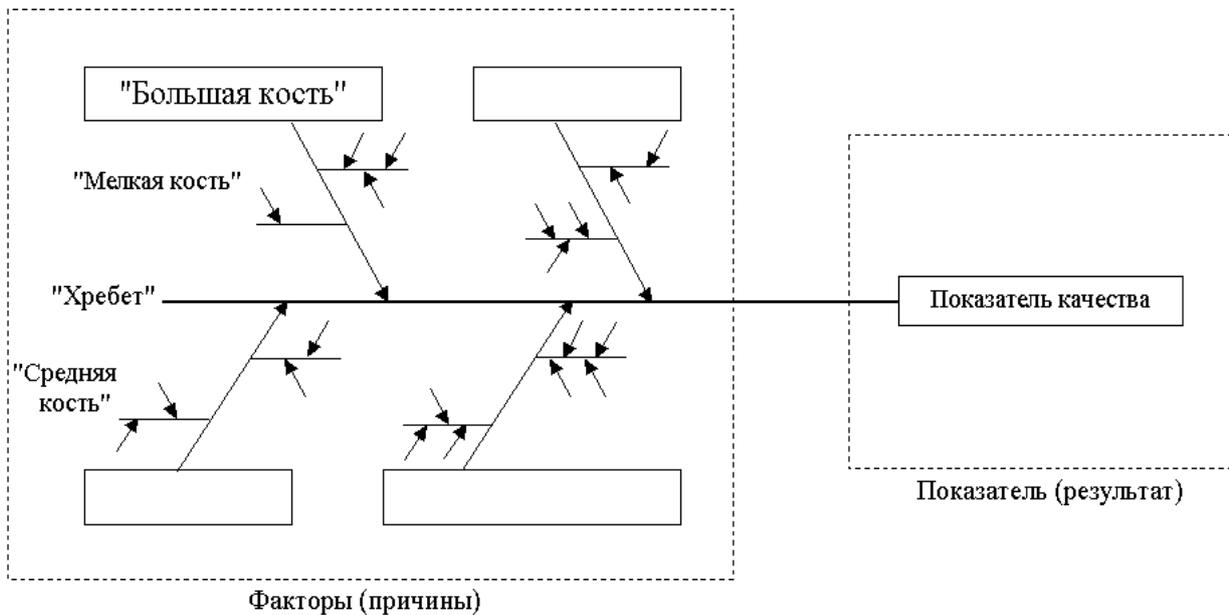


Рис. 2.6. Система получения и использования информации при проведении работ по повышению надежности в процессе их серийного производства





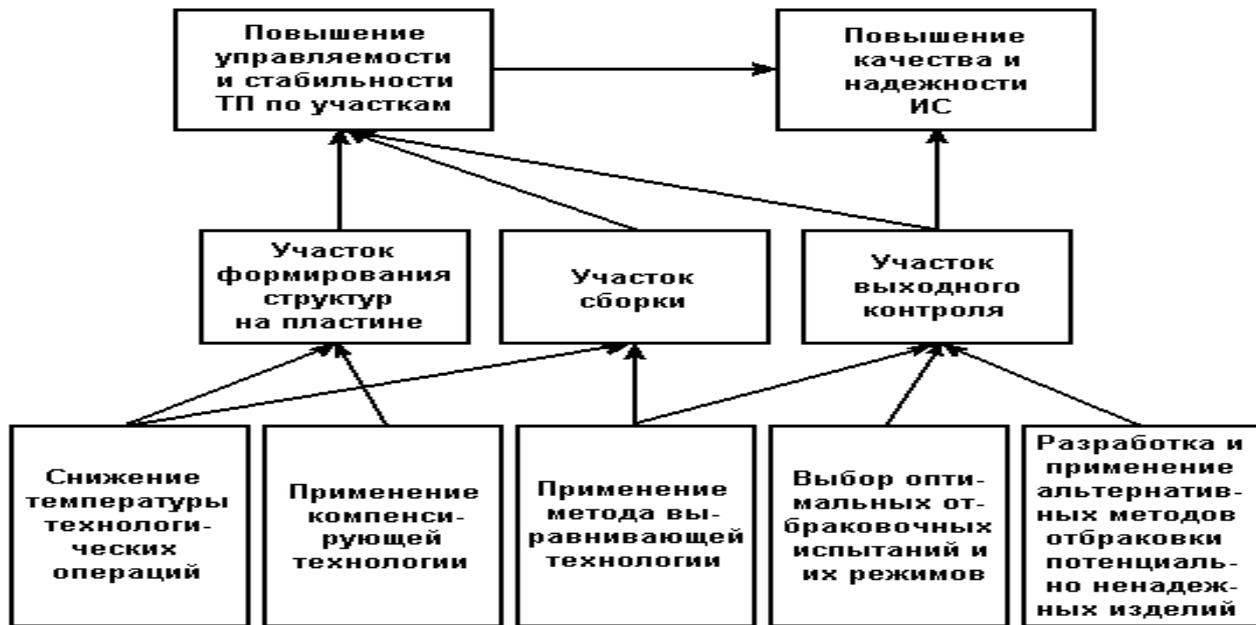


Рис. 5.1. Схема реализации технологических методов повышения надежности ИС в процессе серийного производства

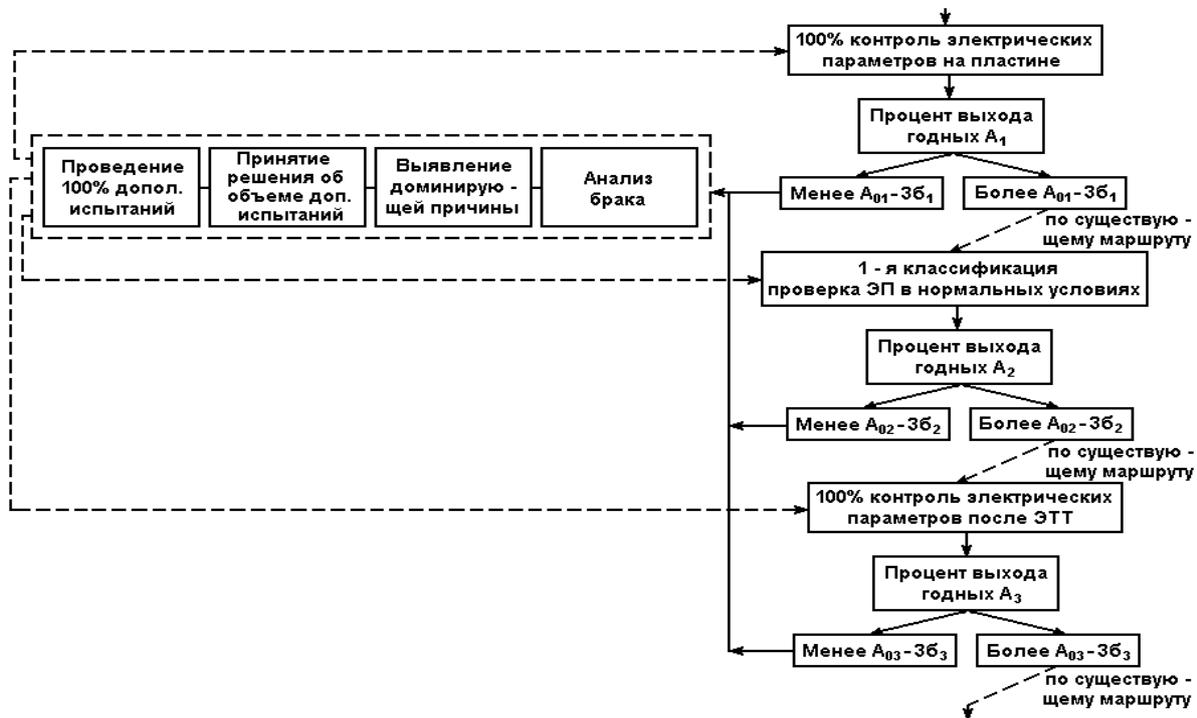


Рис. 5.4. Технологический маршрут изготовления полупроводниковых изделий при применении метода выравнивающей технологии:

$A_{0i}$  – плановый процент выхода годных на  $i$ -той операции

Таблица 5.3

Процент выхода годных 33 партий ИС серии 106 на основных операциях

Номер партии	Процент выхода годных на операции				Номер партии	Процент выхода годных на операции			
	(1)	(2)	(3)	(4)		(1)	(2)	(3)	(4)
1	98,10	98,93	99,70	100,0	18	98,66	96,59	99,77	100,0
2	91,03	96,90	99,18	97,18	19	95,87	97,74	99,65	100,0
3	97,53	97,80	99,22	99,44	20	93,07	97,29	99,65	95,45
4	97,50	98,43	99,66	96,12	21	92,05	97,65	99,51	100,0
5	97,95	96,20	99,53	98,25	22	98,98	97,64	99,12	<b>91,56</b>
6	96,96	97,39	99,67	99,44	23	94,75	97,87	99,52	99,51
7	97,25	98,20	99,89	99,89	24	91,39	97,03	99,51	97,04
8	97,24	96,97	99,67	99,66	25	98,55	97,18	99,44	99,10
9	99,29	96,84	99,67	99,89	26	97,88	94,33	99,87	96,61
10	99,59	95,62	99,77	100,0	27	94,09	97,84	99,54	99,88
11	89,86	97,54	100,0	100,0	28	89,53	97,65	99,64	95,41
12	98,78	96,52	99,55	100,0	29	98,73	97,14	99,77	96,71
13	<b>83,39</b>	97,88	99,59	99,78	30	98,87	97,54	99,70	94,20
14	98,26	96,20	99,45	100,0	31	99,19	<b>88,87</b>	100,0	100,0
15	98,46	98,04	99,33	97,20	32	99,11	94,51	99,69	99,69
16	93,92	97,33	99,63	97,50	33	98,34	96,89	<b>94,96</b>	99,58
17	98,38	97,13	99,56	100,0					

Таблица 5.4

## Обобщенные данные по 33 партиям ИС

Технологическая операция	Количество ИС, прошедших операцию, шт.	Годные, шт.	Брак, шт.	Фактический процент выхода годных	Плано-вый процент выхода годных	$\sigma_i$ , %	$3\sigma_i$ , %	Установленное нижнее значение процента выхода годных
(1)	32580	31320	1260	96,13	95,614	3,730	11,20	84,40
(2)	29574	28660	914	96,90	96,746	1,739	5,217	91,53
(3)	28447	28315	132	99,53	99,500	0,830	2,490	97,00
(4)	27506	27049	457	98,34	99,570	2,110	6,330	93,24

Таблица 1.1

## Достижения в развитии СБИС ДОЗУ

Параметры	Годы					
	1982	1984	1986	1988	1990	1995-2000
Технологический уровень (ТУ)	ТУ3	ТУ4	ТУ5	ТУ6	ТУ7	ТУ8
Минимальный топологический размер, мкм	2,0-2,5	1,2-1,6	0,8-1,2	0,8-1,0	0,5-0,7	0,2-0,4
Длина стороны кристалла, мм	5	6,5	7,5	10	13,7	15,8
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	28	43	40-70	80-140	110-150	200-250
Число слоев (максимальное)	9	10	12	14	16	18
Плотность дефектов, см <sup>-2</sup>	2,86	1,83	1,16	0,72	0,38	0,25-0,3
<b>Объем ДОЗУ</b>	64К	256К	1М	4М	16М	64М
Число транзисторов, млн. шт.	0,28	0,83	2,5-3	6-10	30-35	140
Оптимальный диаметр пластины, мм	100	125	150	200	200	300

Таблица 3.1

Пооперационный выход годных и пооперационные потери при изготовлении ИС серии КР142

Номер операции	Операция	Выход годных на операции, %	Нарастающий выход годных, %	Потери от запуска, %	Потери на операции, отнесенные к общему количеству потерь, %
1	Контроль внешнего вида кристаллов	96,3	96,3	3,7	6,67
2	Напайка кристалла	98	94,4	1,9	3,47
3	Приварка выводов	99,9	94,3	0,1	0,18
4	Контроль арматуры собранной	89,9	84,8	9,5	17,4
5	Герметизация	89,9	76,2	8,6	15,8
6	Контроль статических параметров при нормальных условиях	85,88	65,4	10,8	19,8
7	Контроль электрических параметров при повышенной температуре	88,9	58,1	7,3	13,4
8	Проверка выходной мощности	98	57,0	1,2	2,2
9	Вторая проверка статических параметров при нормальных условиях	87,08	49,6	7,4	13,6
10	Контроль внешнего вида	96,6	47,9	1,7	3,1
11	Приемо-сдаточные испытания	95	45,5	2,4	4,4
	Всего:		45,4	54,6	~100

Учебное издание

Горлов Митрофан Иванович  
Николаева Елена петровна

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Компьютерный набор О.А. Ивановой

ЛР № 066815 от 25.08.99. Подписано к изданию 21.10.02.

Уч.-изд.л. 7,8

Воронежский государственный технический университет  
394026 Воронеж, Московский просп., 14

