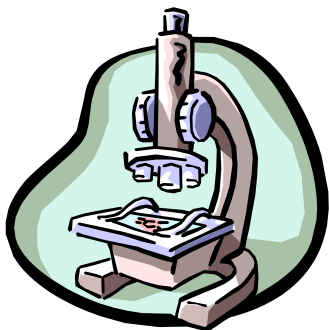


**М.И. Горлов      Е.П. Николаева**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕ-  
ТОДЫ  
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНО-  
СТИ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

Учебное пособие



Воронеж 2005

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Воронежский государственный  
технический университет

М.И. Горлов      Е.П. Николаева

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕ-  
ТОДЫ  
ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНО-  
СТИ  
ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Утверждено Редакционно-издательским  
советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2005

УДК 521.3.049.77.019.3

Горлов М.И., Николаева Е.П. Конструкционные методы повышения надежности интегральных схем: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. 263 с.

В учебном пособии освещаются вопросы влияния выбора конструкции кристалла, корпусов, методов монтажа кристаллов в корпус и т.п. на надежность интегральных схем.

Данное учебное пособие полностью соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной и заочной форм обучения, дисциплине «Конструкционные методы повышения надежности интегральных микросхем», а также Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по подготовке магистров техники и технологии по направлению 140400 «Техническая физика», дисциплине «Технологические и конст-

рукционные методы повышения надежности ИС».

Учебное пособие подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе Word for Windows и содержится в файле Надежность.exe.

Табл. 70 . Ил. 51 . Библиогр.: 15 назв.

Научный редактор д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Рецензенты: кафедра физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета (зав. кафедрой д-р физ.-мат. наук, проф. Е.Н. Бормонтов); д-р техн. наук, проф. Б.К.

Петров

© Горлов М.И., Николаева Е.П., 2005

© Оформление. Воронежский государственный технический университет, 2005

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вся радиоэлектронная аппаратура (РЭА), применяемая в оборонной и космической технике, в товарах культурно-бытового назначения, построена на полупроводниковых изделиях (ППИ), в том числе наиболее сложных изделиях – интегральных схемах (ИС).

Известно, что конструктивно любые ИС в корпусном исполнении, а речь будет идти в основном о них, состоят из полупроводникового кристалла, в котором различными физико-химическими способами создается структура и топология схемы, и корпуса, защищающего кристалл от вредных воздействий.

Кристалл ИС крепится на основании корпуса пайкой или склеиванием, а микропроводкой или другим способом создаются соединения от кристалла к траверсам корпуса. Надежность и долговечность ИС зависит от надежности схемы, изготовленной на кристалле, от надежности корпуса и от взаимного влияния кристалл – корпус.

Все хорошо понимают, что конструкция любой машины зависит от конструкции ее деталей и узлов. При конструировании ИС необходимо разработать электрическую схему (схематическое решение), выбрать технологический метод изготовления схемы на кристалле (биполярный и/или МДП), выбрав при этом материал полупроводника с необходимыми параметрами, метод изоляции элементов (диэлектрический, р-п-переходом или комбинированный), метод получения структур элементов схемы (диффузионный или

ионного легирования), способ защиты поверхности кристалла, тип корпуса, метод крепления кристалла к основанию корпуса, материал и способ крепления внутреннего выводов.

Специфика конструирования ИС такова, что выбор технологии изготовления ИС определяет во многом и ее конструкцию. Поэтому в полупроводниковой электронике речь идет о конструктивно-технологических особенностях разрабатываемой ИС.

В предлагаемом учебном пособии, написанном авторами на основе десятилетнего опыта чтения лекций по курсу «Конструкционные методы повышения надежности интегральных микросхем», рассматриваются основные понятия в теории качества и надежности, требования к конструкции ИС и обеспечение надежности при конструировании ИС, а также методы защиты ИС от электростатических

разрядов и методы повышения радиационной стойкости ИС.

Данное учебное пособие полностью соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 210100 «Электроника и микроэлектроника», специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной и заочной форм обучения, дисциплине «Конструкционные методы повышения надежности интегральных микросхем», а также Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по подготовке магистров техники и технологии по направлению 140400 «Техническая физика», дисциплине «Технологические и конструкционные методы повышения надежности ИС».

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ТЕОРИИ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ

## 1.1. Термины и определения

В настоящее время наиболее распространена теория относительного качества, сущность которой состоит в том, что качество изделий определяется его целевым назначением.

*Качество* - совокупность свойств изделия, обуславливающих его пригодность удовлетворять определенные потребности 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 величи-

ной претензий потребителей к данному типу изделий с входного контроля или 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 изготовителя ППИ важнейшим показателем качества служит процент выхода годных ППИ. Это объясняется тем, что выход годных изделий определяет в комплексе управляемость и стабильность производства, что, в свою очередь, связано с показателем надежности ППИ.

*Надежность* есть внутреннее свойство изделия сохранять свои характеристики (значения параметров) в заданных пределах и в заданных условиях эксплуатации.

Под *изделием* понимается элемент, прибор, блок, аппаратура, система, машина и т.п.

Из определений качества и надежности видно, что качество – понятие субъек-



тивное, а надежность изделия обязательно связана со временем, выполнением заданных функций за это время и зависит от условий эксплуатации.

Надежность изделия *закладывается* при его конструировании, *обеспечивается* при его изготовлении и *сохраняется* при его эксплуатации.

Пусть при конструировании изделия заложена надежность  $P_0$ . При выпуске его надежность в лучшем случае будет равна  $P_0$ . Но за счет разброса материалов, технологических процессов, возможного нарушения техпроцесса или его отклонения надежность изделий при выпуске в период освоения будет равна:

$$P = P_0 - \Delta P.$$

Величина  $\Delta P$  будет определяться управляемостью и стабильностью технологического процесса.

Если же с течением времени будут усовершенствованы конструкция и/или технология или внедрена автоматизация технологических процессов, то надежность выпускаемых изделий будет равна:

$$P = P_0 + \Delta P.$$

Надежность выпускаемых изделий будет расходоваться с той или иной степенью быстроты в зависимости от режима и условий эксплуатации. Если условия и режим эксплуатации будут неблагоприятны, то надежность изделий будет расходоваться быстро, и наоборот.

Для описания конкретного изделия пользуются понятиями исправного и работоспособного состояния.

Под *исправным* подразумевается состояние изделия, при котором оно соответствует всем требованиям нормативной документации (техническим условиям – ТУ и конструкторской документации).

*Работоспособное состояние* – такое состояние изделия, при котором параметры, характеризующие способность изделия выполнять заданные функции, соответствуют нормативной документации, однако один или несколько параметров при этом могут иметь отклонение от нормативной документации. При этом изделие может быть работоспособным в одном типе аппаратуры, но не быть работоспособным в другом типе аппаратуры. Примерами таких отклонений параметров изделий могут быть нарушения внешнего вида корпуса изделия, увеличение обратного тока или уход коэффициента усиления транзистора за допустимые по техническим условиям нормы, увеличение выходного напряжения

логического нуля или уменьшение выходного напряжения логической единицы за допустимые техническими условиями нормы, не влияющие на работоспособность данной аппаратуры.

Характеристикой изделия, связанной с его эксплуатацией, является *наработка*, представляющая собой продолжительность или объем работы изделия.

Календарная продолжительность от начала эксплуатации до наступления предельного состояния изделия называется *сроком службы или долговечностью*.

Под *безотказностью (или временем безотказной работы)* понимают свойство изделия непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки.

*Сохраняемость* – свойство изделия непрерывно сохранять исправное состояние в течение, и после хранения и транспортировки. Например, наработка ИС в

режимах и условиях, устанавливаемых ТУ на ИС конкретных типов, должна выбираться из ряда 15 000, 20 000, 25 000, 50 000 ч и более. Конкретное значение наработки для ИС устанавливается в ТУ на эти схемы. Срок сохраняемости ППИ должен соответствовать одному из значений: 10, 12, 15, 20 и 25 лет, что указывается в ТУ на конкретное ППИ.

Изменение состояния изделия, ведущее к потере этих свойств, в теории надежности рассматривается как отказ.

*Отказ* – событие, после которого надежность изделия уменьшается. Другими словами, отказ – событие, приводящее к потере работоспособности, наступающей внезапно или постепенно.

*Вид отказа* – это форма проявления отказа.

*Механизм отказа* – это физический, химический или другой процесс, вызывающий отказ изделия.

Для ППИ *отказ* – это событие, заключающееся в полной утрате работоспособности изделия или уходе одного либо нескольких параметров за допустимые по техническим условиям нормы.

Имеющийся всегда разброс параметров исходных материалов, применяемой технологической оснастки, режимов работы технологического оборудования и других факторов влияет на продолжительность безотказной работы конкретного ППИ. Поэтому отказ конкретного изделия носит случайный по времени характер.

В табл. 1.1 представлены виды отказов для различных признаков деления отказов для ИС.

По механизму отказы ППИ можно разделить на пять категорий:

- отказы, связанные с явлениями в объеме кристалла;
- отказы, обусловленные явлениями на поверхности кристаллической структуры;
- отказы, зависящие от состояния внутренних контактных соединений;
- отказы, связанные с конструктивным оформлением;
- отказы, связанные с внешними воздействиями при применении ИЭТ.

Таблица 1.1

		<p><b>Связь с другими отказами</b></p> <p>Возможность последующего использования изделия после возникновения отказа</p> <p>Наличие внешних проявлений</p> <p>Характер устранения отказа</p>	<p>Независимый отказ</p> <p>Зависимый отказ</p> <p>Полный отказ</p> <p><b>ЧАСТИЧНЫЙ ОТКАЗ</b></p> <p>Очевидный (явный) отказ</p> <p>Скрытый (неявный) отказ</p> <p>Устойчивый отказ</p>	
			<p>Самоустраняющийся отказ</p>	<p><b>С</b></p> <p>Перемещаемый</p>
<p>Признак деления</p>	<p>Вид отказа</p>			
<p><i>Характер изменения параметра до момента возникновения отказа</i></p>	<p>Внезапный (катастрофический) отказ</p> <p>Постепенный (деградационный) отказ</p>			

В табл. 1.2 представлены для примера основные механизмы отказов ИС, связанные с технологическими операциями и конструктивными ошибками.

Таблица 1.2  
Основные механизмы отказов

		Сборка	Отслаивание металла Растрескивание кристалла Пережим проволочного вывода или его отслаивание в месте сварки Формирование интерметаллического соединения Посторонняя частица Царапина на кристалле
Технологическая операция	Механизм отказа	Герметизация корпуса*	Негерметичность корпуса Образование усов на металлизации, коррозия Проникновение влаги
Диффузия и окисление	Дефект оксида Загрязнение Поверхностные состояния Ошибки в топологии	КЗ, О	Воздействие статического электричества Превышение допустимых электрических режимов
		Применение Д КЗ, О, Д	
Металлизация	Разрыв на ступеньке оксида Коррозия Электромиграция Обрыв у контакта Ошибка при травлении	О	О, КЗ – короткое замыкание, О – обрыв, Д – деградация электрических параметров.
		О, КЗ	

## показатели надежности

*Критерием надежности* называют признак, по которому определяется надежность различных изделий. Количественное значение критерия надежности конкретного изделия называют характеристикой или количественным показателем надежности.

Для практического использования очень удобны временные показатели надежности. Время безотказной работы в этом случае является непрерывной случайной величиной. Для непрерывных случайных величин пользуются понятием функции распределения  $P(x)$  или  $P(t)$ . Функцию распределения называют также интегральным законом распределения.

Количественно надежность можно оценивать такими показателями, как веро-

ятность безотказной работы, вероятность появления отказа, интенсивность отказа.

*Вероятность безотказной работы* изделия  $P(t)$  – это вероятность того, что при заданных режимах и условиях работы в данный момент времени отказ не возникает.

Возникновение отказа является случайным событием, поэтому время появления отказа  $t$  также случайная величина.

Как функция распределения  $P(t)$  обладает следующими свойствами (рис. 1.2):

$P(t)$  – монотонно убывающая функция, т.е. при  $t_2 > t_1$  имеем  $P_2(t) < P_1(t)$ .

$P(t)$  изменяется в пределах  $0 \leq P(t) \leq 1$ .

При  $t = 0$  имеем  $P(0) = 1$ , а при  $t \rightarrow \infty$  функция  $P(t) \rightarrow 0$ .

Исправная работа и отказ являются событиями несовместимыми, противоположными, поэтому вероятность появления отказа  $F(t)$  равна:

$$F(t) = 1 - P(t).$$

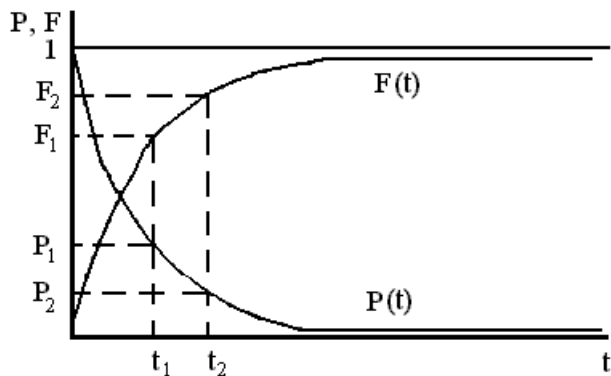


Рис. 1.2. Зависимость функции  $P(t)$  и  $F(t)$

$F(t)$  также является функцией распределения случайной величины  $t$ .

Функция  $F(t)$  обладает следующими свойствами (см. рис. 1.2):

$F(t)$  – монотонно возрастающая функция, т.е. при  $t_2 > t_1$  имеем  $F_2(t) > F_1(t)$ .

$F(t)$  изменяется в пределах:  $0 \leq F(t) \leq$

1.

При  $t = 0$  имеем  $F(0) = 0$ , а при  $t \rightarrow \infty$  функция  $F(t) \rightarrow 1$ .

Выше говорилось, что надежность изделия сохраняется при эксплуатации. На рис. 1.3 представлены зависимости функции безотказной работы от величины коэффициента нагрузки. Видно, что для момента времени  $t_1$  вероятность безотказной работы изделия имеет соотношение  $P_1 > P_2 > P_3$  при следующих соотношениях коэффициентов нагрузки на изделие:  $K_{Н1} < K_{Н2} < K_{Н3}$ .

*Интенсивность отказов*  $\lambda_i(t)$  – это число отказавших изделий в единицу времени, отнесенное к числу изделий, непре-

равно работающих к началу рассматриваемого промежутка времени:

$$\lambda_i(t) = \frac{\Delta n_i}{N - n_i \Delta t_i},$$

где  $\Delta n_i$  – число изделий, отказавших за промежуток времени  $\Delta t_i$ ;  $n_i$  – число изделий, отказавших к началу промежутка времени  $\Delta t_i$ ;  $N$  – общее число изделий.

$\lambda$  имеет размерность 1/ч.

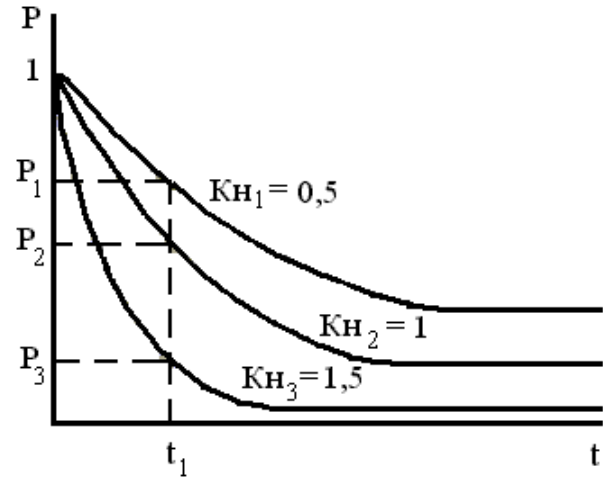


Рис. 1.3. Зависимость функции  $P(t)$  от коэффициента нагрузки на изделие

Для измерения интенсивности отказов ППИ зарубежные изготовители обыч-



но подсчитывают относительное число приборов, которые могут отказаться в течение каждых  $10^5$  ч работы (т.е. процент на 1000 ч). В Японии более предпочтительной единицей измерения является количество отказов на  $10^9$  ч (так называемый ФИТ), так как она позволяет более удобно и наглядно отразить сверхмалые интенсивности отказов японских изделий.

Интенсивность отказов в электрических режимах, установленная в стандартах и/или технических условиях на отечественные ПП и ИС конкретных типов, в течение наработки не должны превышать значений из ряда:

- $3 \cdot 10^{-7}$  1/ч – для маломощных транзисторов;
- $5 \cdot 10^{-7}$  1/ч – для транзисторов средней мощности;
- $10^{-6}$  1/ч – для мощных транзисторов;

- $10^{-6}$ ;  $5 \cdot 10^{-7}$ ;  $3 \cdot 10^{-7}$ ;  $10^{-7}$ ;  $5 \cdot 10^{-8}$ ;  $3 \cdot 10^{-8}$ ;
- $2 \cdot 10^{-8}$ ;  $10^{-8}$ ;  $5 \cdot 10^{-9}$ ;  $3 \cdot 10^{-9}$ ;  $2 \cdot 10^{-9}$ ;  $10^{-9}$ ;  $5 \cdot 10^{-10}$ ;
- $3 \cdot 10^{-10}$ ;  $2 \cdot 10^{-10}$ ;  $10^{-10}$  1/ч – для ИС.

Типичная кривая зависимости интенсивности отказов от времени представлена на рис. 1.4. Ее еще называют "ванной отказов". Приведенная зависимость имеет три ярко выраженных участка.

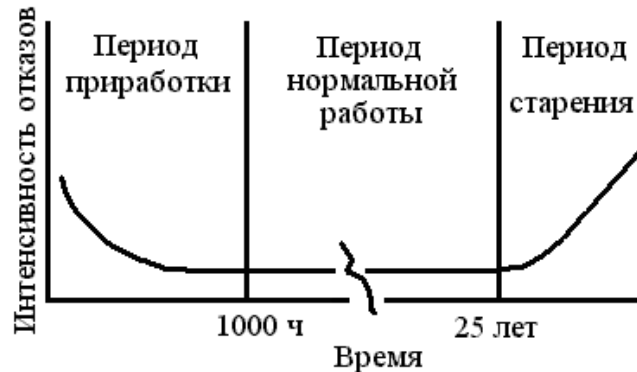


Рис. 1.4. Типовая зависимость интенсивности

## отказов ППИ от времени

Первый участок называется периодом приработки. Он характеризуется повышенным значением  $\lambda$ . В этот период выходят из строя изделия, имеющие какие-либо скрытые дефекты, которые не могли быть обнаружены в технологическом процессе их изготовления. Длительность первого участка для ППИ: от нескольких десятков до тысячи часов.

Второй участок характеризуется практически постоянной интенсивностью отказов. При эксплуатации ППИ этот участок является основным. Для ППИ принято считать, что:

– невысокая надежность – при  $\lambda > 10^4$  1/ч;

– средняя надежность – при  $10^6 < \lambda \leq 10^4$  1/ч;

– высокая надежность – при  $10^9 < \lambda \leq 10^6$  1/ч;

– сверхвысокая надежность – при  $\lambda \leq 10^9$  1/ч.

Время нормальной работы для ИС в настоящее время принято равным 150 тыс. часов.

Третий участок характеризуется быстрым увеличением частоты отказов. Это объясняется тем, что ППИ уже выработали свой ресурс и начали быстро выходить из строя вследствие старения.

В каждом периоде (см. рис. 1.4) для разных типов изделий законы распределения отказов могут быть различными. Поэтому для описания распределения отказов в течение всех трех периодов используется суперпозиция законов распределения, соответствующих указанным периодам:

$$f(t) = c_1 f_1(t) + c_2 f_2(t) + c_3 f_3(t), \quad (1.1)$$

где  $c_1, c_2, c_3$  – нормирующие коэффициенты, определяемые через отношение числа соответствующей группы отказов к общему числу изделий;  $f_1(t), f_2(t), f_3(t)$  – распределение отказов соответственно в 1, 2, 3-м периодах. Сумма отказов всех трех групп равна общему числу изделий, поэтому  $c_1 + c_2 + c_3 = 1$ .

Интенсивность отказов ППИ зависит от коэффициента нагрузки на изделие (рис. 1.5). Из рисунка видно, что при увеличении нагрузки уменьшается период приработки, но также уменьшается и период нормальной работы при снижении надежности, т.е. при увеличении  $\lambda$ .

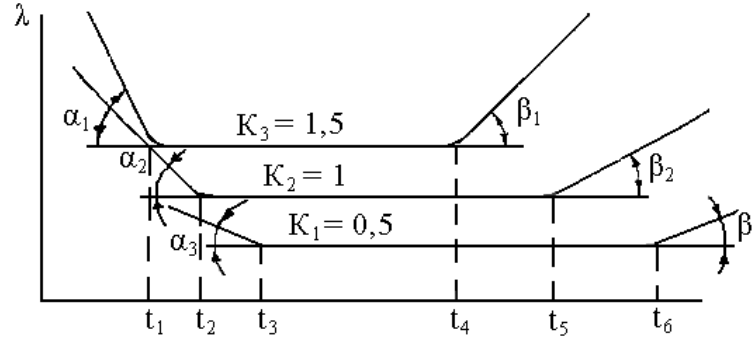


Рис. 1.5. Зависимость  $\lambda$  от коэффициента нагрузки на изделие  $K$

В соответствии с рис. 1.5 можно сделать выводы, что при  $K_3 > K_2 > K_1$  имеем:

- а)  $t_1 < t_2 < t_3$ ;
- б)  $t_4 < t_5 < t_6$ ;
- в)  $t_6 - t_3 > t_5 - t_2 > t_4 - t_1$ ;
- г)

$$\alpha_1 > \alpha_2$$

$$> \alpha_3;$$

д)  $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$ .

Формулировка интенсивности отказов и форма зависимости сохраняются при замене времени на количество циклов, импульсов, ударов и т.п. Например, на рис. 1.6 приведен график зависимости  $\lambda$  от количества ударов с ускорением 150 g для выпрямительных диодов типа Д226. На этом графике также виден период нормальной работы при постоянном воздействии многократных ударов.

Если необходимо определить величину интенсивности отказов за период наработки  $T$ , то формула будет иметь вид

$$\lambda_{ст} = n/(NT), \quad (1.2)$$

где  $\lambda_{ст}$  – статистическое значение интенсивности отказов;  $n$  – число отказов за период  $T$ .

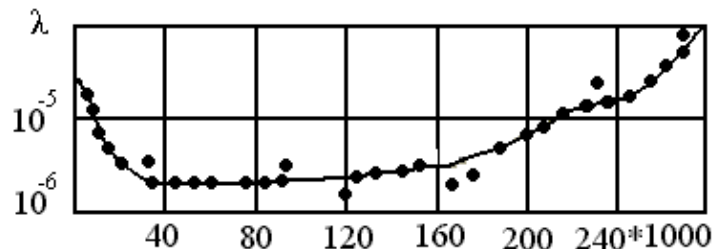


Рис. 1.6. График зависимости  $\lambda$  от числа ударов для диодов Д226

С учетом достоверности получаемых результатов формула (1.2) преобразится в формулу

$$\lambda = K_p^*/(NT), \quad (1.3)$$

где  $K_{p^*}$  – коэффициент, выбираемый из табл. 1.4 в зависимости от числа отказов  $n$  и значения доверительной вероятности  $P^*$ .

Таблица 1.4

$P^*$	$K_{p^*}$ при $n$				
	0	1	2	3	4
0,6	0,92	2,0	3,1	4,2	5,3
0,9	2,3	3,9	5,3	6,6	8,1
$P^*$	$K_{p^*}$ при $n$				
	6	7	8	9	10
0,6	7,3	8,4	9,4	10,5	11,6
0,9	10,5	11,8	15,0	14,2	15,3

### 1.3. Зависимости между основными характеристиками надежности

Под *плотностью вероятности времени неисправной работы* понимают отношение числа отказов  $dn$  в интервале времени  $dt$  к произведению общего числа

элементов  $N$ , поставленных на испытания, на длину интервала  $dt$ :

$$f(t) = dn/(Ndt) = \frac{dn}{N/S(Sdt)} = \lambda(t) P,$$

где  $S = N - n$  – число исправно работающих изделий;  $dn/(S dt) = \lambda$ ;  $S / N = P$ .

Поскольку  $f(t) = dF/dt = - dP/dt$ , то  $\lambda(t) P = -dP/dt$ , отсюда

$$\lambda(t) dt = -dP/P.$$

Проинтегрируем последнее выражение при  $P(0) = 1$  и после преобразования получим

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

Средняя наработка до отказа  $\bar{T}$  – математическое ожидание наработки до первого отказа:

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} \frac{t dP(t)}{dt} dt = - \int_0^{\infty} t dP(t) = -tP(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} P(t) dt ;$$

$$\bar{T} = \int_0^{\infty} P(t) dt .$$

Эта формула устанавливает зависимость между временем и вероятностью исправной работы. Видно, что  $\bar{T}$  есть площадь, ограниченная кривой вероятности исправной работы. При  $\lambda = \text{const}$  имеем:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \text{ и } \bar{T} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = 1/\lambda ,$$

тогда

$$P(t) = e^{-t/\bar{T}} .$$

В большинстве технических условий на ППИ указывается не срок сохраняемости, а *гамма-процентный срок сохраняемости*  $T_\gamma$  – срок, в течение которого ППИ не достигает предельного состояния с заданной вероятностью  $\gamma$ -процентов.

Полагая закон распределения времени безотказной работы ППИ экспоненциальным, имеем:

$$e^{-\lambda T_\gamma} = \gamma/100 .$$

Логарифмируя данное выражение, получим:

$$T_\gamma = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100} = -\bar{T} \ln \frac{\gamma}{100} .$$

Опытное значение  $\gamma$ -процентов вычисляется по формуле

$$\gamma = (1 - n/N) \cdot 100,$$

где  $n$  – число отказов в выборке;  $N$  – объем выборки.

Для ИС гамма-процентный срок сохраняемости выбирается при заданной вероятности  $\gamma = 95\%$ , для полупроводниковых приборов при  $\gamma = 98\%$ .

#### 1.4. Примеры решения задач по надежности

**Задача 1.** При испытании 200 ИС в течение 1000 ч имеем 2 отказа. Определить  $\lambda$  при доверительной вероятности 0,6 и 0,9.

Используем формулу

$$\lambda = K_p^*/(NT).$$

Из табл. 1.4 при  $n = 2$  находим  $K_p^*_{0,6} = 3,1$  и  $K_p^*_{0,9} = 5,3$ .

$$\begin{aligned} \lambda_{0,6} &= 3,1/(200 \cdot 1000) = 1,55 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч} = \\ &= 1,55\% / 1000 \text{ ч} = \\ &= 15500 \text{ фит;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{0,9} &= 5,3/(200 \cdot 1000) = 2,65 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч} = \\ &= 2,65\% / 1000 \text{ ч} = \\ &= 26500 \text{ фит.} \end{aligned}$$

Эта задача нахождения  $\lambda$  – прямая. Так как в формуле есть еще три переменные, то могут быть и три обратные задачи: по определению  $n$ ,  $N$  и  $T$ .

**Задача 2.**

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,1\% / 1000 \text{ ч} \\ N &= 100 \\ n &= 1 \\ \underline{P^*} &= \underline{0,6} \\ T &= ? \end{aligned}$$

Ответ:  $T = 20\,000$  ч.

**Задача 3.**

$$\lambda = 1500 \text{ фит}$$

$$\begin{aligned}
 n &= 0 \\
 P^*_1 &= 0,6 \\
 P^*_2 &= 0,9 \\
 T &= 1000 \\
 N_1 - ? \quad N_2 - ?
 \end{aligned}$$

Ответ:  $N_1 = 600$ ;

$$N_2 = 1500.$$

**Задача 4.**

$$\begin{aligned}
 \lambda &= 10^{-6} \text{ 1/ч} \\
 T &= 5000 \text{ ч} \\
 N &= 100 \\
 \underline{P^* = 0,6} \\
 n - ?
 \end{aligned}$$

Ответ:  $n = 0$ .

**Задача 5.**

$$\begin{aligned}
 T_\gamma &= 30\,000 \text{ ч} \\
 \underline{\gamma = 95\%} \\
 \lambda - ?
 \end{aligned}$$

**Используем формулу**

$$T_\gamma = - \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\gamma}{100}.$$

Ответ:  $\lambda$

$$= 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

**Задача 6.**

$$\begin{aligned}
 \lambda &= 10^{-6} \text{ 1/ч} \\
 \underline{\gamma = 95\%} \\
 T_\gamma - ?
 \end{aligned}$$

Ответ:  $T_\gamma = 6$  лет.

**Задача 7.**

$$\begin{aligned}
 N &= 100 \\
 \gamma &= 95\% \\
 \underline{T_\gamma = 10 \text{ лет}} \\
 n - ?
 \end{aligned}$$

Ответ:  $n = 5$  шт.



## Контрольные вопросы

1. Дайте определение качества полупроводниковых изделий.
2. Какими основными показателями качества пользуются изготовители ППИ?
3. Какие показатели качества используются потребителями изделий?
4. Дайте определение надежности полупроводниковых изделий.
5. Когда закладывается и сохраняется надежность изделий?
6. Когда обеспечивается надежность изделия?
7. Объясните  $P = P_0 \mp \Delta P$ . Приведите пример.
8. Объясните понятия: исправное, работоспособное состояние, наработка, срок

службы или долговечность, безотказность, сохраняемость.

9. Что такое отказ изделия?
10. Объясните понятия: вид и механизм отказа, признаки деления отказов.
11. Назовите пять категорий отказов интегральных схем по их механизму.
12. Какие отказы называются самоустранивающимися?
13. Дайте определение понятия вероятности безотказной работы, свойства функции.
14. Дайте определение понятия вероятности появления отказов, свойства функции.
15. Дайте определение интенсивности отказов, ее типовой зависимости от времени, единицы измерений.
16. Какова классификация ППИ по уровням надежности?
17. Покажите графически зависимость интенсивности отказов от коэффициента нагрузки.

18. Выведите формулу зависимости между основными характеристиками надежности.

19. Дайте определение понятия гамма-процентного срока сохраняемости.

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

### 2.1. Технические требования к конструкции ИС

Общие технические условия на ИС, зависящие от вида приемки, определяют технические требования к их конструкции. Например, ГОСТ 18725-83 является общими техническими условиями на микросхемы интегральные широкого применения. В указанном стандарте требования к конструкции ИС определены следующим образом:

1. Общий вид, установочные размеры и обозначение выводов должны соответствовать чертежам, приведенным в стандартах или технических условиях (ТУ) на ИС конкретных типов.

2. Масса ИС не должна превышать значений, установленных в стандартах или ТУ на ИС конкретных типов.

3. ИС должны быть герметичны.

Показатель герметичности по скорости утечки газа в полых корпусах не должен быть более:

- $5 \cdot 10^{-3}$  Па·см<sup>3</sup>/с ( $5 \cdot 10^{-5}$  л·мкм рт.ст./с)
- для ИС с внутренним объемом до 1 см<sup>3</sup>;
- $5 \cdot 10^{-2}$  Па·см<sup>3</sup>/с ( $5 \cdot 10^{-4}$  л·мкм рт.ст./с)
- для ИС с внутренним объемом более 1 см<sup>3</sup>.

Конкретные значения показателей герметичности указывают в стандартах или ТУ на ИС конкретных типов.

Показатель герметичности ИС в пластмассовых корпусах не регламентируется.

4. Выводы ИС должны выдерживать без механических повреждений воздействия следующих механических факторов:

- растягивающей силы, направленной

ной вдоль оси вывода. Значение растягивающей силы зависит от площади поперечного сечения вывода. Например, величина растягивающей силы для ИС в корпусе 1102.8-1 не более 2,5 Н (0,25 кгс);

– изгибающей силы – для гибких проволочных выводов. Минимальное расстояние места изгиба вывода от корпуса указывают в стандартах или ТУ на ИС конкретных типов.

5. Выводы ИС должен обеспечивать способность их пайки при температуре  $(235 \pm 5)^\circ\text{C}$ ,  $(270 \pm 10)^\circ\text{C}$  или  $(350 \pm 10)^\circ\text{C}$ .

ИС должны выдерживать воздействие тепла, возникающего при температуре пайки  $(260 \pm 5)^\circ\text{C}$  или  $(350 \pm 10)^\circ\text{C}$ . Конкретное значение температуры пайки, расстояние до корпуса, продолжительность пайки указывают в стандартах или ТУ на ИС конкретных типов. Например, для ИС серии КР1005 в ТУ указана температура

пайки  $(235 \pm 5)^\circ\text{C}$ , расстояние от корпуса до места пайки вывода не менее 1 мм, продолжительность пайки  $(2 \pm 0,5)$  с. ИС должны выдерживать воздействие тепла, возникающего при температуре пайки  $(260 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

Наружные металлические поверхности ИС должны быть коррозионно-стойкими в условиях хранения и эксплуатации.

6. Наружные металлические покрытия и маркировки должны быть устойчивы к воздействию спиртобензиновой смеси.

7. Стекло (керамика) и спаи стекла (керамики) с металлом должны быть механически прочными и термически стойкими.

8. ИС должны быть механически прочными и сохранять свои параметры в процессе и после воздействия на них механических нагрузок в соответствии с табл. 2.1.

9. ИС должны быть устойчивы к климатическим воздействиям и сохранять свои параметры в процессе и после воздействия на них следующих климатических факторов:

– пониженной рабочей температуры среды, выбираемой из ряда:  $-10$ ,  $-25$ ,  $-45$ ,  $-60$  °С, – и пониженной предельной температуры среды  $-60$  °С;

– повышенной рабочей температуры среды, выбираемой из ряда:  $55$ ,  $70$ ,  $85$ ,  $100$ ,  $125$ ,  $155$  °С;

ТАБЛИЦА 2.1

Воздействующий фактор и его параметры	Значения параметров среды до пониженной рабочей группы ИС по температуре среды;	
	1	эксплуатации
Синусоидальная вибрация: диапазон частот, Гц амплитуда ускорения, м/с <sup>2</sup> (g)	1 – 500 100 (10), 150 (15)	– изменения температуры среды в пределах от повышенной рабочей температуры до пониженной рабочей температуры; – относительной влажности не более 98 % при температуре 35 °С без конденсации влаги; – атмосферного пониженного давления 26 664 Па (200 мм рт.ст.); – атмосферного повышенного давления до 294 199 Па (3 кгс/см <sup>2</sup> ).
Механический удар одиночного действия: пиковое ударное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g) длительность действия ударного ускорения, мс	1500 (150) 1 – 6	ИС, предназначенные для эксплуатации в условиях тропического климата, должны быть устойчивы к воздействию повышенной влажности воздуха (длительное воздействие), соляного тумана и среды, зараженной плесневыми грибами, при условии покрытия их защитными лаками.
Линейное ускорение, м/с <sup>2</sup> (g)	500 (50) 2000 (200) 5000 (500) 10000 (1000) 20000 (2000)	Квалификационные испытания как средство подтверждения соответствия конструкции ИС

требованиям ТУ

Квалификационные испытания (К) проводят один раз на каждом предприятии-изготовителе при приемке установочной серии.

При изменении конструкции и/или технологии ИС могут быть проведены квалификационные испытания в полном составе или по отдельным группам в зависимости от типа изменений.

Состав испытаний, деление состава испытаний на группы и последовательность групп должны соответствовать указанным в табл. 2.2.

ТАБЛИЦА 2.2

Группа	Вид последовательность испытания	Примечание
1	2	3
К-1	Проверка внешнего вида и маркировки	С-1. Приемочный уровень: 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0; 12,0; 13,0; 14,0; 15,0; 16,0; 17,0; 18,0; 19,0; 20,0; 21,0; 22,0; 23,0; 24,0; 25,0; 26,0; 27,0; 28,0; 29,0; 30,0; 31,0; 32,0; 33,0; 34,0; 35,0; 36,0; 37,0; 38,0; 39,0; 40,0; 41,0; 42,0; 43,0; 44,0; 45,0; 46,0; 47,0; 48,0; 49,0; 50,0; 51,0; 52,0; 53,0; 54,0; 55,0; 56,0; 57,0; 58,0; 59,0; 60,0; 61,0; 62,0; 63,0; 64,0; 65,0; 66,0; 67,0; 68,0; 69,0; 70,0; 71,0; 72,0; 73,0; 74,0; 75,0; 76,0; 77,0; 78,0; 79,0; 80,0; 81,0; 82,0; 83,0; 84,0; 85,0; 86,0; 87,0; 88,0; 89,0; 90,0; 91,0; 92,0; 93,0; 94,0; 95,0; 96,0; 97,0; 98,0; 99,0; 100,0

		2,5 %
К-2	Проверка габаритных, установочных и присоединительных размеров	С-2. N n = 0
К-3	Проверка статических параметров (параметров постоянного тока), относенных к категории С, при: – нормальных климатических условиях, – пониженной рабочей температуре среды,	С-3. П ный у 0,10; 0 0,25 %

Продолжение табл. 2.2

1	2	
	– повышенной рабочей температуре среды.	
	Проверка динамических параметров (параметров переменного тока), относенных к категории С, при нормальных климатических условиях.	
	Функциональный контроль при: – нормальных климатических усло-	

	виях, – повышенной рабочей температуре среды.		ударов.		Продолжение табл. 2.2	
<b>К-4</b>	Испытание на воздействие пониженной рабочей температуры среды. Испытание на воздействие повышенной рабочей температуры среды. Проверка электрических параметров, отнесенных к категории П, при нормальных климатических условиях. Проверка электрических параметров, отнесенных к категории К. Функциональный контроль при: – нормальных климатических условиях, – повышенной рабочей температуре среды.	П-2. $N_1 = 20,$ $n_1 = 0.$ При $n_1 = 1, N_2 = 40,$ $n_2 = 0.$		2	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха (кратковременное).	
				<b>К-6</b>	Испытание на безотказность.	П-1. $n = 0.$
				<b>К-7</b>	Проверка качества прочности нанесения маркировки. Проверка прочности внешних выводов. Испытание на способность к пайке. Испытание на теплостойкость при пайке. Испытание на герметичность.	П-4. $n = 0.$
К-5	Испытание на воздействие изменения температуры среды. Испытание на воздействие линейного ускорения. Испытание на воздействие одиночных	П-3. $N_1 = 20,$ $n_1 = 0.$ При $n_1 = 1, N_2 = 40,$ $n_2 = 0.$		<b>К-8</b>	Испытание упаковки.	Единицы транспортируемые с
				<b>К-9</b>	Испытание на вибропрочность. Испытание на виброустойчивость. Испытание на ударную прочность	П-5. $n_1 = 0.$ $n_1 = 1,$



<b>9</b>	(многократные удары).	$n_2 =$	<b>К-13</b>	Испытание на воздействие плесневых грибов.	$N = 5$
<b>К-10</b>	Проверка массы. Испытание на воздействие атмосферного повышенного давления. Испытание на воздействие атмосферного пониженного давления.	$P-4$ $n =$	<b>К-14</b>	Испытание на воздействие соляного тумана.	$N = 5$
			<b>К-15</b>	Испытание на способность вызывать горение. Испытание на горючесть (кроме ИС в металлоглазном, металлокерамическом, стеклокерамическом и керамическом корпусах).	$N = 3$
			<b>К-11</b>	Испытание на долговечность.	$P-6$ . $N = 20$ $n = 0$ .
<b>К-12</b>	Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха (длительное) с покрытием ИС лаком.	$P-6$ $n_1$ $n_1$ $n_2$	Для проведения испытаний комплектуют выборку ИС в объеме, достаточном для всех групп испытаний, по соответствующим планам контроля с учетом порядка контроля этих групп в пределах данной категории.		

Окончание табл. 2.2

В примечании показаны, какие группы квалификационных испытаний соответствуют приемосдаточным (С-1, С-2, С-3) и периодическим испытаниям (П-1, П-2, П-3, П-4, П-5, П-6), а также приемочный уровень и планы контроля для испытаний ИС

малой и средней степени интеграции (ИС1 и ИС2).

При двухступенчатом контроле испытания начинают с проверки выборки  $N_1$ . Если при испытании выборки  $N_1$  число дефектных ИС, обнаруженных в выборке, не превышает приемочного числа  $n_1$  плана контроля, то результаты испытаний по данной группе испытаний считают положительными и испытания выборки  $N_2$  не проводят.

Если число дефектных ИС, обнаруженных в выборке  $N_1$ , превышает число  $n_1 + 1$ , то результаты испытаний по данной группе испытаний считают отрицательными и испытания выборки  $N_2$  не проводят. Если при испытании выборки  $N_1$  число дефектных ИС, обнаруженных в выборке, равно числу  $n_1 + 1$ , то результаты испытаний по данной группе считают неопределенными и испытывают выборку  $N_2$ . Если при испытании выборки  $N_2$  число дефектных ИС, обнаруженных в выборке, превышает приемочное число  $n_2$ , то результа-

ты испытаний по данной группе испытаний считают отрицательными.

### **2.3. Методы проверки конструктивно-технологических запасов ИС**

При оценке качества полупроводниковых изделия электронной техники используются понятия, характеризующие запасы по тому или иному электрическому параметру по отношению к нормам технических условий. Запасы по электрическим 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 по электрическим параметрам  $K_3$  определяют как безразмерную величину. При отсутствии информации о законе распределения параметров предельные значения  $X_{НЗ}$ ;  $X_{ВЗ}$  (нижнее и верхнее значения норм электрических параметров) можно определить экспериментально на основе большой выборки. Выражение для коэффициента запаса  $K_3$  для верхнего и нижнего значений норм будет иметь вид

$$K_{ВЗ} = \frac{X_{МАКС.ТУ} - X_{МАКС.}}{X_{МАКС.} - X_{СРЕДН.}} \cdot 100\% ;$$

$$K_{НЗ} = \frac{X_{МИН.} - X_{МИН.ТУ}}{X_{СРЕДН.} - X_{МИН.}} \cdot 100\% ,$$

где  $X_{МИН. ТУ}$ ,  $X_{МАКС. ТУ}$  – нижнее и верхнее значения норм, указанных в ТУ,  $X_{СРЕДН.}$  –

среднее значение параметра в выборке,  $X_{МАКС.}$ ,  $X_{МИН.}$  – максимальное и минимальное значение параметра в выборке.

На стадии проведения ОКР, изготовления установочной серии периодически проводятся специальные испытания по определению конструктивно-технологических запасов и распределению отказов ИС в зависимости от видов и степеней жесткости воздействующих факторов.

Испытания на стадии проведения ОКР проводят с целью определения:

- запасов устойчивости ИС к различным видам внешних воздействий;
- предельно допустимых электрических режимов эксплуатации;
- резонансных частот конструкции ИС.

Перечень испытаний ИС указан в табл. 2.3.

Испытания установочной серии проводят с целью определения способности в условиях данного производства изготавливать ИС с запасами устойчивости к внешним воздействующим факторам не ниже, чем установлено на ОКР.

Периодические испытания проводят с целью определения стабильности производства и сохранения конструктивно-технологических запасов во времени с периодичностью один раз в квартал.

При изменении конструкции и/или технологии по согласованию с ОТК проводятся испытания с целью подтверждения сохранения конструктивно-технологических запасов в объеме, не ниже объема периодически проводимых испытаний.

Каждому виду испытания по табл. 2.3 подвергается ИС своей выборки. Испытание ИС по определению запасов устойчивости к конкретному виду воздейст-

вия прекращают, если отказало 30 – 50 % объема выборки, поставленной на испытание, или подтверждена устойчивость ИС на конечной стадии испытаний.

Подобным испытаниям на определение конструктивных запасов подвергают отдельно корпуса ИС.

2.4.1. Для оценки *тепловых характеристик ИС* могут использоваться следующие методы:

- метод контроля температуры жидкими кристаллами;
- метод контроля температуры с применением жидко-кристаллических термоиндикаторов (ЖКТИ);
- метод контроля температуры с помощью микропирометров;
- метод контроля температуры с помощью термоэлектрических преобразователей;
- метод контроля температуры р-п-переходов по термозависимым параметрам.

При этом должно быть определено распределение температуры по поверхности кристалла при максимально подаваемой мощности. Эти данные необходимы для выявления участков, которые в результате неправильно выбранной конструкции или технологического процесса изготовле-

## 2.4. Методы испытаний

ния имели недопустимо высокую температуру.

Измерения проводятся на разгерметизированных ИС с удаленной крышкой. Для ИС в монолитных корпусах оценку тепловых характеристик не проводят.

2.4.2. Определение *теплового сопротивления ИС* проводится с целью выявления правильности выбора конструкции и технологического процесса изготовления ИС, приводящего к недопустимому перегреву кристалла и снижению ее надежности.

При определении теплового сопротивления ИС используют распределение температур по поверхности кристалла, корпуса, полученное любым из способов, изложенных выше. Температура и подаваемая мощность при этом соответствуют повышенной рабочей температуре согласно ТУ на ИС.

Из полученных данных определяется максимальная температура поверхности кристалла, корпуса, после чего вычисляется значение теплового сопротивления по следующим формулам:

для теплового сопротивления «кристалл – корпус»:

$$R_{T.KP.-KOP.} = \frac{T_{МАКС.КР.} - T_{КОР.}}{P_{РАС.}} ;$$

для теплового сопротивления «кристалл – окружающая среда»:

$$R_{T.KP.-OKP.} = \frac{T_{МАКС.КР.} - T_{ОКР.}}{P_{РАС.}} ,$$

где  $T_{МАКС. КР}$  – максимальная температура поверхности кристалла;  $T_{КОР.}$  – температура корпуса при измерении;  $T_{ОКР.}$  – тем-

пература окружающей среды при измерении;  $P_{PAC}$  – рассеиваемая мощность.

2.4.3. Испытания на *воздействие теплового удара* проводят с целью определения запасов прочности элементов конструкции ИС, распределения отказов в зависимости от степени жесткости данного воздействия и сравнительной оценки текущего качества и стабильности технологического процесса производства ИС ступенчатым расширением диапазона температур согласно табл.2.4.

Таблица 2.4

Номер ступени	Нижнее значение температуры, °C	Верхнее значение температуры, °C
1	0	+100
2	-60	+150
3	-60	+200
4	-196	+200

Проверку электрических параметров, установленных в ТУ, и контроль герметичности проводят через 10, 25, 40, 70 и 100 циклов при нормальной температуре.

2.4.4. Испытания на *циклическое воздействие измерения температуры среды* проводят с целью определения запасов устойчивости к данному виду воздействия при повышенной и пониженной температуре окружающей среды, при ступенчатом расширении диапазона температур согласно табл. 2.5.

Таблица 2.5

Номер ступени	Нижнее значение температуры, °C	Верхнее значение температуры, °C
1	-60	+125
2	-60	+150
3	-60	+200
00		

Проверку электрических параметров, установленных в ТУ, и контроль герметичности проводят по окончании каждой ступени при нормальной температуре.

2.4.5. *Одиночным ударам* ИС подвергают последовательно по ступеням испытаний, указанным в табл. 2.6.

На каждой ступени испытаний проводят по 5 ударов по осям x, y, z. При этом считается, что резонансные частоты корпусов превосходят 1000 Гц.

Таблица 2.6

Ступень испытания	Пиковое ударное ускорение, допустимых по ТУ при эксплуатации ИС.
1	30 000 (3 000)
2	50 000 (5 000)
3	100 000 (10 000)
4	150 000 (15 000)
5	200 000 (20 000)
6	300 000 (30 000)
7	500 000 (50 000)
8	1 000 000 (100 000)

2.4.6 Испытания по *определению резонансных частот* проводят с целью проверки механических свойств микросхем и получения исходной информации для выбора методов испытаний на вибропрочность, виброустойчивость, на воздействие акустического шума, а также для выбора длительности действия ударного ускорения при испытаниях на воздействие механических ударов одиночного и многократного действия. При этом имеется в виду, что собственная резонансная частота ИС должна быть выше частоты механических воздействий.

Резонансные частоты ИС могут быть определены при помощи микроскопа, стробоскопа, рентгенотелевидения, вибропреобразователя и других приборов или по изменению выходных параметров ИС. При испытаниях допускаются любые способы крепления ИС, обеспечи-



вающие передачу воздействия к исследуемой ИС, но не искажающие (не изменяющие) ее резонансных свойств. При определении резонансных частот внутренних выводов и навесных элементов гибридных ИС допускается вскрытие ИС.

Испытания проводят в диапазоне частот  $(0,2 - 1,5) \cdot f_{рез}$ , но не выше 20 000 Гц, где  $f_{рез}$  – резонансная частота ИС, определенная методом расчета или на основании испытаний ИС аналогичной конструкции.

Если ориентировочное значение резонансной частоты неизвестно, то испытания проводят в диапазоне частот 100 – 20 000 Гц. Поиск резонансных частот проводят путем плавного изменения частоты при поддержании постоянной амплитуды ускорения.

Амплитуда ускорения должна быть минимально возможной, но достаточной для выявления резонанса и не превышать

амплитуды ускорения, установленной для испытания на вибропрочность. Амплитуду ускорения рекомендуется выбирать из диапазона  $10 - 50 (1 - 5) \text{ м} \cdot \text{с}^{-2} (\text{g})$ .

При поиске резонансных частот определяют резонансы: корпуса ИС, внутренних выводов, навесных элементов. У ИС в пластмассовых корпусах определяется только резонанс корпуса. За резонансную частоту ИС принимается нижнее значение резонансных частот корпуса, выводов, навесных элементов, определенных при испытаниях.

2.4.7. Испытания ИС на *воздействие повышенной температуры среды* проводят со ступенчатым повышением температуры. На начальной ступени устанавливается повышенная рабочая температура среды по ТУ на ИС. На каждой последующей ступени испытаний температура увеличивается на +25 °С. Конечная темпера-

тура испытаний 300 °С. Время выдержки ИС на каждой ступени должно быть не менее 30 мин. После каждой ступени испытаний при нормальных условиях проводят проверку электрических параметров, указанных в ТУ.

2.4.8. Испытания ИС на *воздействие ступенчатой электрической нагрузки* при повышенной рабочей температуре среды, заданной в ТУ на ИС, проводят путем ступенчатого увеличения электрической нагрузки (напряжения, тока или мощности) ИС, начиная с предельно допустимой по ТУ. Нагрузка на последующих стадиях увеличивается на 10 %. Время выдержки ИС на каждой ступени испытаний равно 24 ч. После каждой ступени испытания при нормальных условиях проводят проверку электрических параметров, указанных в ТУ.

2.4.9. Испытания по *определению точки росы* проводят с целью определения

присутствия влаги в подкорпусном объеме ИС в количестве, достаточном, чтобы отрицательно повлиять на ее элементы. ИС помещают в камеру, температуру в которой устанавливают на 10°С выше температуры окружающей среды. На выводы ИС подают напряжения и токи, указанные в ТУ, и непрерывно контролируют ток утечки или другой информативный параметр.

Температуру в камере понижают до минус 65 °С, а затем повышают до повышенной предельной, установленной в ТУ. Скорость изменения температуры не должна быть более 10 °С в минуту.

Температуру точки росы определяют по началу резкого скачка измеряемого параметра.

*Контрольные вопросы*

1. Каковы технические требования к конструкции ИС по внешнему виду, массе, герметичности, внешним выводам?

2. Каковы технические требования к внешним выводам ИС по паяемости и коррозионной стойкости?

3. Каковы технические требования к ИС по механическим нагрузкам?

4. Каковы технические требования к ИС по климатическим воздействиям?

5. Какие виды испытаний ИС существуют на заводе-изготовителе, периодичность их проведения?

6. Каков состав квалификационных испытаний, их периодичность, количество ИС, необходимых для их проведения?

7. Каков состав периодических испытаний, периодичность их проведения, количество ИС, необходимых для их проведения?

8. Каков состав приемо-сдаточных испытаний, объем и критерии оценки испытаний?

9. Что такое двухступенчатый контроль?

10. Напишите формулы экспериментального определения запасов по электропараметрам.

11. Расскажите о методах испытаний на воздействие теплового удара и термоциклирование.

12. Расскажите о методах определения резонансных частот.

13. Расскажите о методе определения точки росы.

### 3. ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ

#### НА НАДЕЖНОСТЬ ИС

##### **3.1. Ограничения и допуски на компоненты ИС**

Первый шаг к обеспечению высокой надежности должен делаться в процессе разработки ИС. Главная цель при разработке ИС: обеспечить максимальный выход годных, максимальную надежность и минимальную стоимость изделий. Между этими требованиями не должно быть, по существу, никаких противоречий, а разработанная конструкция ИС должна быть хорошо согласована и сопряжена

с возможностями технологического процесса ее изготовления.

Необходимо учитывать при разработке ИС следующие требования отраслевого стандарта ОСТ В 11 0998-99 "Микросхемы интегральные. Общие технические условия":

– максимальная плотность дислокаций  $5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ ;

– максимальная плотность дефектов упаковки  $10^2 \text{ см}^{-2}$ ;

– максимальная толщина защитных пленок для ИС:

не менее 0,6 мкм для двуокиси кремния;

не менее 0,2 мкм для нитрида кремния,

при защите ФСС – не менее 1 мкм.

– неравномерность толщины защитной пленки не более 10 %;

– содержание легирующих примесей (в защитном оксиде и между двумя слоями металлизированной разводки) для пленок ФСС не более 3,5 весовых;

– содержание влаги в подкорпусном объеме при температуре 100 °С не более 0,5 %, при температуре 22 °С не более 0,05 %.

Внутренние соединения на кристалле, подложке (токоведущие проводники, контактные площадки и др.) в зависимости от материала и конструкции, должны быть изготовлены таким образом, чтобы при работе ИС в предельно допустимом электрическом режиме плотность тока в местах минимального сечения соединения с учетом допустимых дефектов не превышала значений, приведенных в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Материал и конструкция соединения	Значение плотности тока, А/мм <sup>2</sup>
Алюминий (чистый или легированный), не защищенный неорганическим покрытием	2·10 <sup>6</sup>
Алюминий (чистый или легированный), защищенный неорганическим покрытием	5·10 <sup>6</sup>
Золото	6·10 <sup>6</sup>
Все другие материалы (если не оговорено в ТУ иное)	2·10 <sup>6</sup>

При расчете плотности тока используется значение поперечного сечения проводника, уменьшенное на 25 % относительно проектируемого значения.

Минимальная толщина металлизации должна быть 0,8 мкм для однослойной металлизации и для верхнего слоя металла при многослойной металлизации и 0,6 мкм

для нижнего слоя (слоев) металла при многослойной металлизации.

Если предусмотрено нанесение золота на обратную сторону кристалла, то оно не должно наноситься электролитическим методом. Толщина золотого покрытия должна быть не менее 0,45 мкм и не более 1 мкм.

Прочность крепления кристалла к монтажной площадке должна быть не менее величины, указанной в табл. 3.2

Таблица 3.2

Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	До	От	От	От	От	От	От	От	От
	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Минимально-допустимое усилие сдвига, кгс,									

для эвтектического спая,	0,2	0,6	1,0	1,4	1,6	1,8
для клея	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9

Прочность внутренних сварных соединений проволочных и ленточных выводов должна быть не менее величины, указанной в табл. 3.3

Таблица 3.3

Диаметр вывода, мкм	Минимальная прочность соединения,		
	До герметизации		После герметизации
	Al	Au	Al
менее 27	Устанавливают в ТУ		
27	2,5	3,5	1,5
30	3,0	4,0	2,0
40	4,0	5,0	2,5
50	5,0	7,0	3,5
60	8,0	11,0	6,0
свыше 60	Устанавливают в ТУ		

Внутренние проволочные соединения должны иметь диаметр не менее 26 мкм.

Внутренние проволочные соединения и металлизация на кристалле должны быть изготовлены из однородного материала.

Толщина кристалла должна быть не менее 0,15 мм.

Расстояние между выводами и незащищенной поверхностью кристалла не должно быть менее диаметра вывода.

Все крупные фирмы стараются в настоящее время ужесточить конструктивные допуски, заложенные в их системах автоматизированного (машинного) проектирования, чтобы благодаря этому добиться более высокой однородности характеристик схем. Создаются машинные модели ИС, очень точно описывающие готовые схемы. В составе схемных кристаллов

монтируют встроенные элементы (тестовые структуры) для контроля характеристики технологического процесса и надежности.

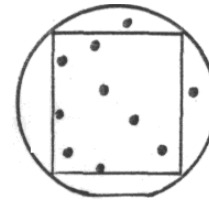
Многие же компании, наоборот, разрабатывают сейчас схемы с увеличенными допусками на элементы, обеспечивая для технологов более широкие рабочие поля допусков. Например, увеличение допусков на резисторы с  $\pm 10$  до  $\pm 15$  % увеличивает, как показал опыт, запас работоспособности изделия при внедрении его в производство, ослабляя влияние разбросов параметров технологического процесса и тем самым повышая качество ИС.

### **3.2. Ограничения при выборе размеров кристалла**

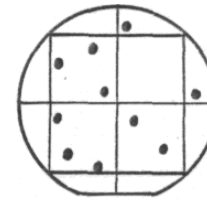
Конструкция кристалла монолитной ИС предусматривает использование одного исходного материала для изготовления

всех ее элементов (транзисторов, диодов, резисторов, емкостей). Для каждого из этих элементов требуется свое оптимальное значение удельного сопротивления исходного материала, поэтому при разработке ИС принимается компромиссное решение по его выбору. Исходный материал должен иметь наименьшее сопротивление для обеспечения малых значений остаточного напряжения и в то же время достаточное для обеспечения необходимого пробивного напряжения переходов.

Уменьшение размеров элементов ИС вызвано необходимостью увеличения степени интеграции при сохранении минимальной площади кристалла. Большие площади кристалла приводят к снижению процента выхода годных изделий из-за увеличения числа дефектов, приходящихся на одну схему, и соответственно к неизбежному возрастанию стоимости ИС (рис 3.1).



0 годных  
8 годных  
кристаллов  
кристаллов  
из 1 = 0 %  
из 16 = 50 %



1 годный  
кристалл  
из 4 = 25 %



Рис 3.1. Влияние размеров кристалла и плотности дефектов на выход годных ИС

Минимальный размер компонентов схемы в зависимости от удельного сопротивления материала, краевого размытая,



флуктуации примесей и от влияния космических лучей ограничен долями микрометра.

Основной физической причиной, ограничивающей произвольное уменьшение размеров полупроводниковых приборов, по-видимому, следует считать конечное значение толщины р-п-переходов, барьеров Шоттки и других неоднородных областей, которые должны "свободно" уместиться в приборе.

Для резкого р-п-перехода его эффективная толщина определяется выражением:

$$\omega = \left[ \frac{2\varepsilon\varepsilon_0(U - U_D)}{e} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

где  $N_{D(A)}$  – концентрация донорных (акцепторных) примесей;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость, для Si  $\varepsilon = 12$ ;  $U_D = (kT/e) \ln(N_D \cdot N_A / n_i^2)$  – диффузионное напряжение;  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-14}$  Ф/см;  $n_i$  – концентрация собственных носителей тока.

При заданном напряжении на переходе  $U$  уровень легирования  $N$  на слаболегированной стороне р-п-перехода определяется из условия отсутствия лавинного пробоя перехода в случае биполярного транзистора и оксида под затвором в полевом транзисторе. Для определения зависимости напряжения лавинного пробоя резкого р-п-перехода в кремнии от концентрации легирующей примеси на слаболегированной стороне можно воспользоваться выражением:

$$U_D = 5,6 \omega N^{0,3} \quad [\text{В/см}]. \quad (3.2)$$

Совместное рассмотрение выражений (3.1) и (3.2) при  $U \leq 1$  В и  $N = 10^{19}$  см<sup>-3</sup> дает оценку  $\omega \geq 0,03$  мкм. Следовательно, при обычных температурах и концентрации примесей на слаболегированной стороне, не превышающей  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, в качестве минимального размера полупроводниковой структуры, содержащей резкие р-п-переходы, может служить величина  $d \approx 3\omega = 0,1$  мкм. Того же порядка получается оценка для минимальных размеров структуры полевых транзисторов, но при несколько меньшем уровне легирования.

Найденная оценка минимального размера фактически соответствует и предельным технологическим возможностям, поскольку для воспроизведения структур таких размеров с точностью  $\pm 10\%$  необходима разрешающая способность технологических методов порядка  $0,01$  мкм, близкая к предельно возможной.

При меньших размерах элементов вступают в силу физические ограничения, связанные, например, с квантовомеханическими эффектами в малых объемах полупроводника и с туннельным переносом носителей через тонкие диэлектрики.

Физически расчетные минимальные размеры кристалла могут быть порядка  $0,001$  мм<sup>2</sup>. Практически минимальные размеры кристаллов составляют  $0,5$  мм<sup>2</sup>, так как более мелкие кристаллы существенно усложняют производство, в особенности резку пластин на кристаллы, сборку кристаллов в корпус и крепление внутренних выводов. Тогда как американские изготовители стараются, основываясь на более современной технологии, переходить на кристаллы все меньшего размера, японские изготовители более осторожны в вопросе размещения схемы на кристалле. Данные рис. 3.2 свидетельствуют о том, что с годами площадь элемента ИС

уменьшилась, за это время отношение используемой площади кристалла к общей возросло с 12 до 65 %.

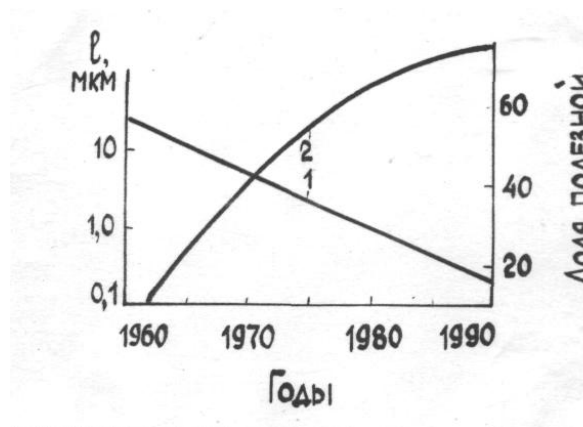


Рис. 3.2. Эволюция минимального размера элементов ИС (1) и отношения полезной поверхности кристалла к общей (2)

С другой стороны, для БИС и СБИС ограничения минимальных размеров

элементов являются рассеиваемая мощность и длина линии связи между элементами на кристалле.

Для нормального функционирования СБИС полная мощность  $P$ , рассеиваемая межсоединениями, должна быть существенно меньше отводимой от кристалла мощности, то есть

$$P \ll Q \cdot S, \quad (3.3)$$

где  $Q$  – мощность, отводимая с единицы площади;  $S$  – площадь кристалла схемы.

Соотношение между длиной линии связи  $l$  на кристалле ИС и рассеиваемой мощностью  $P$  определяется условиями отвода рассеиваемой мощности от поверхности ИС. Если с единицы площади поверхности кристалла отводится мощность  $Q$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ), то при рассеиваемой мощности  $P$  на вентиль и при работе одного из 10 вен-

тилей в кристалле для площади  $l^2$  на один вентиль получим условие:

$$l^2 \geq P/(10 \cdot Q). \quad (3.4)$$

Соответствующая обратная величина, равная числу логических элементов, приходящихся на  $1 \text{ см}^2$  поверхности ИС, отражает уровень развития технологии и называется *степенью интеграции*:

$$S = l^2 \leq 10 \cdot Q/P \quad (3.5)$$

При этом оптимальная степень интеграции

$$S_{\text{опт}} = 10 \cdot Q/P_{\text{опт}} \quad (3.6)$$

Для кремния при  $U = 1 \text{ В}$ ,  $d \approx 0,1 \text{ мкм}$ , поверхностной плотности отводимой

от ИС мощности  $Q = 10^5 \text{ Вт/см}^2$ , найдем:

$$P_{\text{опт}} = 1 \text{ мВт}, S_{\text{опт}} = 10^5 \text{ см}^{-2}, l_{\text{опт}} = 14 \text{ мкм}.$$

В то же время в кремниевых ССБИС (сверхскоростных) с предельно высоким быстродействием оптимальная степень интеграции  $S_{\text{опт}}$  больше зависит от времени задержки на вентиль, а не от минимальных размеров логических элементов, поэтому получим расчетное значение  $S_{\text{макс}} = 10^8 \text{ см}^{-2}$ , что на три порядка больше определенного значения  $S_{\text{опт}}$  для БИС.

Достигаемая при построении некоторых СБИС цель состоит в получении не максимального быстродействия, а максимальной энергетической экономичности и соответственно максимальной степени интеграции при менее жестких требованиях к

быстродействию. Минимальное значение рассеиваемой при этом мощности, определяемое как:

$$P_{\min} = 10 \cdot Q / S_{\max}, \quad (3.7)$$

при  $Q = 10 \text{ Вт/см}^2$  составляет  $P_{\min} = 1 \text{ мкВт}$ . Этому значению при принятых параметрах отвечает оптимальное время задержки  $\tau_{\text{опт}} = 0,3 \text{ нс}$ . При этом произведение  $P_{\min} \cdot \tau_{\text{опт}} = 0,3 \text{ фДж} < P_{\text{опт}} \cdot \tau_{\min} = 2 \text{ фДж}$  (ф – фемто =  $10^{-15}$ ). Эта величина, характеризующая энергию, рассеиваемую вентиляем за одну логическую операцию, называется *коэффициентом качества логического элемента*.

### 3.3. Конструктивно-технологическое исполнение ИС

#### по методу изоляции элементов

Компоненты ИС, полученные в одном кристалле, должны быть надежно изолированы один от другого так, чтобы между ними не возникало нежелательной электрической связи. По существу, метод изоляции определяет конструктивно-технологическое исполнение схемы. Применяемые в настоящее время методы изоляции ИС можно условно разделить на три группы.

*Изоляция p-n-переходом (диодная изоляция)* – осуществляется с помощью диффузии. К ней относятся наиболее распространенный стандартный метод изоляции с помощью разделяющей  $p^+$ -диффузии, коллекторной или базовой изолирующей диффузии и др.

*Комбинированная изоляция*, когда боковая поверхность изолируется диэлектриком, нижняя граница приборов p-n-

переходом. Диэлектрическая изоляция осуществляется с помощью термического толстого оксида  $\text{SiO}_2$  или комбинации оксида и нитрида (карбида) кремния.

*Полная диэлектрическая изоляция*, когда приборы со всех сторон изолированы диэлектриком. К одному из первых методов изоляции такого типа относится ЕРІС-процесс, сюда же должна быть отнесена КНС-технология, так как активные элементы формируются на диэлектрической (сапфировой) подложке.

Создание изоляции является одной из самых ответственных и трудоемких операций изготовления биполярных схем, поэтому совершенствование биполярной технологии связано, в первую очередь, с уменьшением параметров изоляции, уменьшением площади, занимаемой под изоляцию, увеличением пробивных напряжений изолирующих областей, исклю-

чением паразитных связей и снижением паразитных емкостей.

До 1964 г. изоляция элементов в ИС осуществлялась только с помощью р-п-переходов, изготовляемых диффузионным способом. В настоящее время широкое распространение получили методы изоляции элементов с помощью диэлектриков.

В качестве диэлектрика в основном используется двуокись кремния. Преимущество этого метода по сравнению с изоляцией р-п-переходом состоит в том, что получаемые ИС с изоляцией элементов двуокисью кремния обладают большей стойкостью к радиационным воздействиям. При применении метода диэлектрической изоляции оксидом чаще всего используют кремний ориентации [100], так как ямка травления в этом случае имеет V-образную форму и занимает меньше площади, чем в случае ориентации [111].

Однако технологический процесс получения оксидной изоляции значительно сложнее получения изоляции р-п-переходом, поэтому возможность внесения скрытого дефекта в ИС возрастает.

В качестве диэлектрика могут использоваться и другие материалы, например карбид кремния, осажденный из газовой фазы, с последующим выращиванием двуокиси кремния. При этом получается более прочная, химически инертная структура, чем в случае двуокиси кремния. Аналогично используется и нитрид кремния. Однако методы с применением этих материалов менее отработаны или очень сложны в технологическом отношении, поэтому в настоящее время они находят ограниченное применение.

#### **3.4. Оптимизация межсоединений**

Проблема межсоединений является основной при разработке больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС). В период развития ИС малой степени интеграции они рассматривались как совокупность активных элементов, взаимодействующих через межсоединения. БИС и СБИС представляются уже системами сигнальных линий, которые возбуждаются активными элементами и имеют следующие особенности:

- площадь, занимаемая межсоединениями, увеличилась с 20 % для ИС первой и второй степеней интеграции до 80 % для СБИС;
- с увеличением числа логических элементов в БИС и СБИС увеличивается число внешних межсоединений;
- энергия, затрачиваемая на перезарядку проводников, составляет 70 – 75 %

от всех энергетических затрат в СБИС и имеет тенденцию к увеличению;

- величина погонной емкости межсоединений составляет  $10^{-11}$  Ф/м и влияет на частотные характеристики СБИС;

- время задержки сигнала определяется числом межсоединений и их схематическим решением;

- с увеличением частоты сигналов резко возрастает волновое сопротивление межсоединений;

- при увеличении числа межсоединений появляется необходимость многоуровневой разводки, что значительно усложняет технологию производства БИС;

- структура и надежность микросоединений определяют структуру и надежность систем на основе БИС, СБИС.

В СБИС общая длина проводников примерно в 800 раз превышает длину кри-

сталла. Если предположить, что одна половина проводников расположена вертикально, а другая – горизонтально, то произвольная линия в кристалле пересечет в среднем 400 проводников. Поэтому на один логический элемент приходится десятки проводников и требуется так расположить межсоединения, чтобы создать минимальные помехи. С этой целью трассировку межсоединений необходимо оптимизировать.

При произвольном размещении элементов и ортогональной трассировке средняя длина связи  $\bar{l}_{св}$  определяется линейными размерами монтажного поля кристалла  $L_{кр}$ :

$$\bar{l}_{св} = KL_{кр}, \quad (3.8)$$



где  $K$  – коэффициент,  $L_{кр} = (L_1 + L_2)/2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  – длина и ширина кристалла.

Статический анализ различных трассировок БИС и СБИС показывает, что реально достижимый уровень оптимизации средней длины подчиняется степени  $1/3$ , т.е.

$$\bar{l}_{св} \approx \frac{1}{3} N^{\frac{1}{3}}, \quad (3.9)$$

где  $N$  – количество элементов на кристалле.

Эта зависимость дает хорошее приближение к реальным значениям средней длины связи для сложных схем и может служить ориентиром при оценке алгоритмов и программ автоматизации трассировки.

Предельное значение ширины линии межсоединений  $\omega = 0,1 - 0,5$  мм определяется механизмами джоулевого разогрева,

электромиграции, допустимым временем задержки сигнала (увеличением волнового сопротивления).

Для увеличения степени интеграции делают многоуровневую разводку. Так, на фирмах США (Motorola и Fairchild) разработаны быстродействующие логические матрицы на ЭСЛ-схемах с временем задержки 280 – 300 пс/вентиль. Схемы имеют три слоя металлизации: верхний предназначен для распределения питания, два нижних – для создания схем логики. Только применение высокоэффективных САПР позволило полностью автоматизировать процессы размещения и соединения элементов.

В настоящее время основными материалами для межсоединений являются алюминий и поликремний. Больше предпочтение имеет поликремний. Он обеспечивает низкое пороговое напряжение, хорошее перекрытие ступенек, однородное и

экономичное осаждение. Поликремний является высокотемпературным материалом, и это позволяет производить отжиг после операции травления и ионного легирования. Поликремний широко применяется для создания затворных межсоединений. Алюминий и алюминиевые сплавы применяются в основном для межсоединений отдельных элементов ИС.

С дальнейшим уменьшением размеров элементов и межсоединений между ними возможности этих двух материалов исчерпываются. Так, при размерах элементов менее 2 мкм увеличение сопротивления поликремния резко снижает быстродействие схем. Для алюминиевых тоководящих дорожек характерным значением размера элемента является 1 мкм. С уменьшением этого значения резко возрастает электромиграция алюминия.

С 1997 г. в микроэлектронной промышленности стали применять медные соединения из-за хорошей проводимости меди, позволяющей изготавливать сверхбыстрые схемы. Другие достоинства меди – высокая температура плавления, равная 1083 °С, обеспечивающая соединениям высокую теплостойкость.

Идут энергичные поиски новых материалов. Интерес вызывают силициды металлов и тугоплавкие материалы. Однако их нанесение требует, как правило, высокотемпературных технологических процессов, а также разработки сложных процессов травления структур. Перспективным является химическое осаждение вольфрама из паровой фазы, позволяющее получить пленки с поверхностным сопротивлением 0,06 Ом/л. В качестве материала для межсоединений используется молиб-

ден, дающий тонкую зернистую структуру и позволяющий получить более точный рисунок схем.

Электромиграция, возрастание волнового сопротивления, краевые емкости межсоединений, джоулев разогрев и прочее ухудшают характеристики межсоединений и, следовательно, их надежность.

Электромиграция в межсоединениях представляет процесс перемещения атомов на границе межсоединений, обусловленный градиентом электрохимического потенциала и перепадом температур, которые вызывает движущие силы подобно термоэлектрическому эффекту. Постоянный поток атомов через проводник на границах зерен, дислокациях испытывает завихрения. Дивергенция этого потока, обусловленная массопереносом, изменяет

геометрию проводника, что приводит к его разрушению.

Время работы межсоединений оценивается как

$$t_p = c S j^{-Q} \exp(E_a/kT), \quad (3.10)$$

где  $C$  – коэффициент,  $S$  – поперечное сечение соединения,  $\text{см}^2$ ;  $j$  – плотность тока,  $\text{А}/\text{см}^2$ ;  $Q = 2 - 9$  для разных материалов ИС;  $E_a$  – энергия активации атомов;  $T$  – температура;  $k$  – постоянная Больцмана.

Например, для алюминия:  $Q = 2$ ,  $C = 10^{12} \text{ А}^2\text{с}/\text{см}^6$ ,  $E_a = 1,2 \text{ эВ}$  при  $T = 150^\circ\text{С}$ ,  $S = 10^{-7} \text{ см}^2$ ,  $j = 10^6 \text{ А}/\text{см}^2$ , – получим по данной формуле время работы межсоединения, равное  $t_p = 10^8 \text{ с} \approx 28 \text{ лет}$ .

## Контрольные вопросы

1. Какова основная цель при разработке ИС?

2. Каковы технические требования по плотности дислокаций, по плотности дефектов упаковки, по максимальной толщине и неравномерности защитных пленок, по содержанию легирующих примесей в ФСС?

3. Каков допустимый уровень влажности воздуха в подкорпусном объеме ИС?

4. Какова допустимая плотность тока для расчета конструкции ИС?

5. Каковы значения минимальных толщин металлизации?

6. Каков подход в настоящее время к допускам на элементы ИС?

7. Расскажите о влиянии размера кристалла и плотности дефектов на выход годных ИС.

8. Определите минимальные размеры полупроводниковой структуры на примере резкого p-n-перехода.

9. Каковы реально возможные минимальные размеры кристалла?

10. Какова эволюция минимальных размеров элементов ИС и отношение полезной площади кристалла к общей?

11. Расскажите о степени интеграции, о её оптимальной и максимальных значениях.

12. Что такое коэффициент качества логического элемента?

13. Расскажите о конструктивно-технологических методах изоляции.

14. Расскажите об оптимизации межсоединений в ИС.

15. В чем ограничение применения поликристаллического кремния для межсоединений?

16. Дайте определение электромиграции.

17. Каково время работы межсоединений?

## 4. КОНСТРУКТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОРПУСОВ ИС

### 4.1. Требования к конструкции корпусов

Надежность ИС зависит от надежности схемы, изготовленной на кристалле, от надежности корпуса и от взаимного влияния корпус – кристалл (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Виды отказов ИС в корпусах

Развитие ИС, увеличивающаяся сложность схем и увеличение количества выводов, связывающих ИС с внешней се-

тью, потребителями и источниками входящей информации, повышающиеся с каждым годом требования к надежности ИС ставят очень трудные проблемы перед разработчиками корпусов ИС.

Корпуса должны удовлетворять требованиям малогабаритности, малой массы, высокой надежности при большом количестве выводов и малых расстояниях между выводами. В мировой практике установлены две категории требований для корпусов:

а) требования, способствующие работам изготовителей корпусов:

- уменьшение стоимости изготовления;
- возможность размещения больших кристаллов;
- большое количество выводов;

- улучшенные частотные характеристики;
  - улучшенные электрические характеристики;
  - повышенное теплорассеяние;
  - повышенное качество и надежность;
  - использование новых технологий для уменьшения размеров;
- б) требования для удовлетворения запросов изготовителей ИС:
- уменьшение затрат на сборку схем;
  - увеличение плотности расположения компонентов на кристалле;
  - уменьшение массы;
  - повышение качества и надежности;
  - улучшение электрических характеристик;
  - автоматизация сборки схем.

При создании высоконадежных корпусов ИС, оптимальных как по характеристикам, так и по стоимости, необходимо иметь в виду *ограничения по пяти группам параметров*: геометрическим, электрическим, тепловым, механическим и стоимостным, – как при изготовлении, так и при обслуживании.

Влияние степени интеграции ИС на конструктивное исполнение ее корпуса, что определяет геометрические параметры, можно показать на примере логических схем, оценив, согласно правилу Рента, число необходимых сигнальных выводов (входов-выходов схемы) по формуле  $n = 4,5 \cdot m^{0,4}$ , где  $m$  – число вентилях на кристалле. Добавив число выводов шин питания и заземления, составляющих до 25 % расчетного числа сигнальных выводов, получим, что для разрабатываемых логических схем, содержащих порядка 2,5 – 7,0

тыс. вентилях, необходимы корпуса с числом выводов до 200 (табл. 4.1.).

Таблица. 4.1

Расчетное число выводов корпуса для сборки логических ИС

Число вентилях на кристалле	Число выводов корпуса		
	сигнальных	шин питания и заземления	об
500	54	14	
900	68	16	
2750	106	26	
7250	157	39	



Электрические и тепловые параметры корпусов выдвигают два основных требования к материалам корпусов ИС. Это, по возможности, малая диэлектрическая постоянная материала и повышенная теплопроводность материала. Теплопроводность определяет возможность отвода тепла, выделяемого при работе схемы на кристалле, через корпус; диэлектрическая постоянная определяет задержку сигнала при прохождении его в корпусе и из корпуса, либо в корпус, т.е. определяет возможность реализации быстродействия ИС. Тенденции развития требований к материалам, из которых должны строиться корпуса ИС, иллюстрирует рис. 4.2. Тенденция развития корпусов: диэлектрические постоянные и ширина линии уменьшаются, рассеиваемая мощность увеличивается.

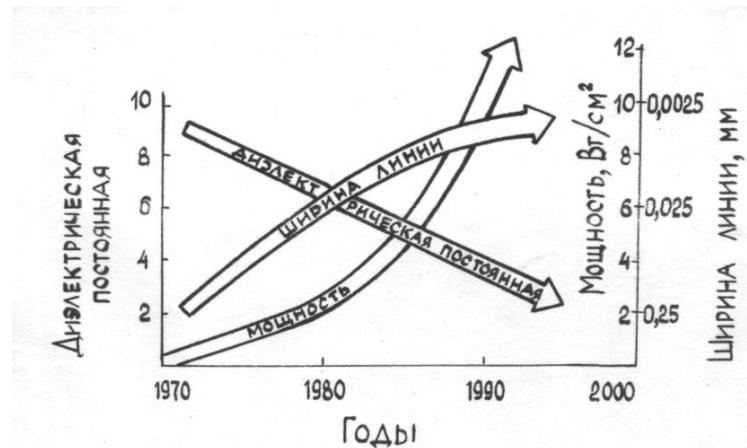


Рис. 4.2. Тенденция развития параметров материала корпусов

Комбинация кристалл-корпус ИС характеризуется многими механическими и тепловыми факторами, а также материалами, которые могут стать причиной деградации или отказа корпуса (рис. 4.3).

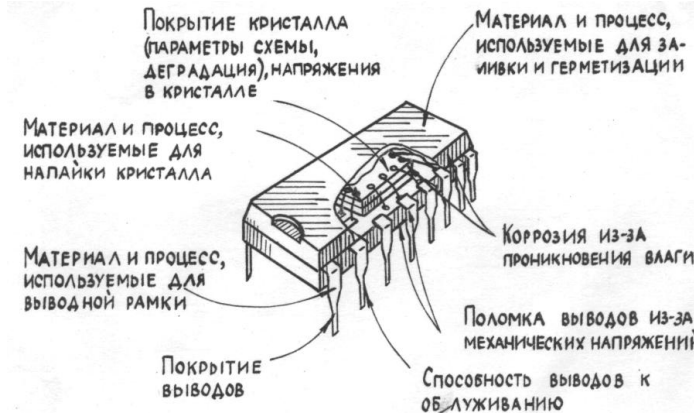


Рис. 4.3. Слабые места в корпусе

Точное моделирование потенциально разрушительных механических и тепловых напряжений позволяет рассчитывать на повышение электрической надежности как самих ИС, так и их корпусов. Разрабатывая модели, на которых имитируется влияние механических напряжений на критические структурные элементы прибора (материалы, выводные рамки, оксидные

слои, металлизацию и покрытия), можно разрабатывать технологические процессы, позволяющие уменьшить напряжение в особо чувствительных точках и, таким образом, свести отказы ИС к минимуму.

Основные механические ограничения связаны с требованиями обеспечения высокой надежности и минимальной стоимости производства. Надежность непосредственно связана с процессом передачи тепла схемой и ее структурной целостностью.

Надежность функционирования системы характеризуется временем, в течение которого ИС успешно работает при данной температуре до возникновения отказа. Для изучения механизма отказа можно использовать метод исследования изменения температуры прибора до наступления отказа. Происходящие при этом процессы приближенно могут быть описаны известным уравнением Аррениуса.

## **4.2. Классификация корпусов по технологии изготовления и используемым материалам**

В самом общем виде корпуса ИС принято делить на металлокерамические, металлостеклянные, стеклокерамические, пластмассовые или их комбинации: металлополимерные и керамикоплимерные. В такой классификации учитывается, прежде всего, какой материал в конструкции корпуса служит механической опорой для монтируемого кристалла и каким осуществляется изоляция выводов (рис. 4.4).

Каждому из технологических типов корпусов присущи свои достоинства и недостатки, однако в целом принято считать, что наиболее надежными являются металлокерамические корпуса, несколько уступают им металlostеклянные и стеклокерамические корпуса (табл. 4.2).

Таблица 4.2

корпуса	Металлокерамический	Металlostеклянный	Стеклокерамический
Сопротивление тепловому удару	А	Б	В
Сопротивление механическому удару	А	С	В
Стойкость к химическим реагентам	А	Б	В
Герметичность	А	Б	В
Проводимость выводов	С	А	В
Стоимость	А	В	С

Качественная оценка характеристик различных технологических типов корпусов ИС

Характеристика	Тип корпуса
----------------	-------------

А, Б, С – высшая, средняя и низшая оценки соответственно.

Конструкция корпусов ИС отличается большим разнообразием, большинство их стандартизовано и разбито на семейства – конструктивные типы. Отличительными признаками последовательных, независи-

мо от технологического варианта изготовления, являются форма тела корпуса (без выводов) и расположение выводов. С этими признаками связан выбор способа монтажа изделий и конструкции печатной платы. В настоящее время известны и широко используются семь типов корпусов (табл. 4.3).

### **4.3. Металлокерамические корпуса**

Совершенная по качеству, разнообразная по химическому составу и физико-техническим характеристикам керамика с 90-х годов стала важнейшим конструкционным материалом для полупроводниковых изделий.

Разработка и широкое применение металлокерамических (в последнее время их стали называть просто керамическими) корпусов для ИС имеют огромное значение для создания надежных, герметичных,

быстродействующих ИС. За последние двадцать лет эти корпуса имели доминирующее значение в обеспечении широкого распространения быстродействующих надежных компьютеров и другой РЭА. Развитие этих корпусов привело к разработке керамических корпусов со штырьевыми выводами, позволивших существенно увеличить число выводов ИС.

Обычно температура спекания этих материалов лежит вблизи 1600 °С.

Основные характеристики наиболее употребительных материалов представлены в табл. 4.4.

Использование керамики в качестве изоляционного материала в корпусах ИС обусловлено уникальным сочетанием его высоких электрофизических свойств с механической прочностью, стойкостью к воздействию температуры, влаги, химически агрессивных веществ и вакуумплотностью. Наибольшее распространение полу-

чила алюинооксидная (корундовая) керамика (80 – 96 %  $Al_2O_3$ ), в меньшей степени используется бериллиевая (95 – 99,5 %  $BeO$ ).



Чистый корунд ( $\alpha$ -модификация оксида алюминия  $Al_2O_3$ ) плавится при температуре 2323 К. При массовом производстве деталей для электронных приборов (оснований и крышек корпусов, подложек,

держателей, различных изолирующих вставок и т.д.) для снижения температуры спекания керамики до 1773-2073 К к исходному порошку глинозема добавляют оксиды марганца, магния, кремния, кальция, хрома, титана, циркония. В результате содержание  $Al_2O_3$ , в зависимости от марки керамики, устанавливается в пределах от 26 до 97 масс. %. За последние 10 – 15 лет для изготовления плат и корпусов ИС разработано и освоено около 20 марок корундовой керамики.

Все марки керамики, которые идут на изготовление корпусов, имеют практически нулевое водопоглощение, удельное объемное сопротивление при комнатной температуре не менее  $10^{14}$  см и пробивное напряжение не менее 10 кВ/мм. При необходимости создания большой рассеиваемой кристаллом мощности алюмооксидную керамику заменяют бериллиевой, которая в 7 – 10 раз превосходит ее по теплопроводности.



Высокая стоимость и токсичность бериллиевой керамики препятствуют более широкому ее применению.

В последнее время стали использовать для этой цели керамику из нитрида кремния, хотя стоимость ее сейчас в десятки раз выше стоимости глинозема.

В табл. 4.5. дано сравнение используемых в корпусах материалов по теплопроводности.

В прогнозах, касающихся перспектив развития керамики для подложек и корпусов ИС, особо отмечается, что наиболее быстрыми темпами будет увеличиваться производство бескислородной керамики (AlN, SiC, BN), стеклокерамических и других композиционных материалов на основе керамики, в которых сохраняются наиболее важные свойства нескольких керамических материалов. Например, можно изготавливать подложки, имеющие высокую теплопроводность нитрида алюминия

и низкую диэлектрическую постоянную муллита ( $3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Si} \cdot \text{O}_2$ ).

Таблица 4.5

Материал	Теплоемкость, Вт
Стекло	0,7
Кварцевое стекло	1,36
Стеклокерамика	5
Ковар (Fe; 29 % Ni; 17,5 % Co)	10
Глинозем (92 %-ный)	20
Латунь	111
Молибден	150
Вольфрам	200
Нитрид алюминия (AlN)	230
Окись бериллия (BeO)	240
Золото	308
Медь	384
Серебро	407

Переход к управлению свойствами создаваемой "электронной" керамики, к предварительному прогнозированию и даже расчету этих свойств станет, по видимому, обычной практикой в техноло-

гии производства керамики в ближайшие годы.

В Японии в настоящее время резко увеличивается объем работ по получению и использованию тонких алмазных пленок (ТАП). Применение ТАП и алмазной керамики открывает большие перспективы в микроэлектронике благодаря их колоссальной теплопроводности (до 900 – 1000 Вт/м·К) и очень высокой диэлектрической прочности (порядка 40 кВ/мм). Уже удается получить ТАП толщиной 0,025 мкм и более, площадью до 20 – 30 см<sup>2</sup> на различных подложках. Рекордная скорость осаждения ТАП (до 180 мкм/ч) достигнута в настоящее время в Японии. Алмазную керамику, получаемую прессованием при высоких температурах и давлении и содержащую до 70 – 95 % зерен алмаза, выпускают многие фирмы Японии, США. Подложки из этой керамики будут использоваться в приборах высокотемпературной микроэлектроники.

#### 4.4. Металлостеклянные корпуса

Другой большой группой диэлектрических материалов, применяемых в корпусах различного типа, являются стекла. Основу многих марок стекол составляет оксид кремния. Но чисто силикатное (кварцевое) стекло имеет малый КТР, порядка  $(0,3 - 0,5) \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, что не позволяет получать ненапряженные прочные спаи с металлами или керамикой. Для увеличения КТР в него вводят группы  $(P_0_4)^{-3}$ ,  $(BO_4)^{-3}$ . Обычными добавками являются также  $Al_2O_3$ ,  $PbO$ ,  $B_2O_3$ . Особым видом диэлектриков являются ситаллы – кристаллизующие стекла, например, на основе лития или магнийалюмосиликатные. По свойствам они занимают промежуточное положение между стеклами обычных марок и керамикой.

Основные недостатки, присущие всем маркам стекол, – низкая теплопроводность, нестойкость к воздействию ки-

слот. Кроме того, стекло – хрупкий материал, а его электрические свойства заметно изменяются с температурой.

#### 4.5. Пластмассовые корпуса

В настоящее время во всех странах ИС широкого применения выпускаются в пластмассовых корпусах (ПК), которые обеспечивают низкую себестоимость и простоту организации автоматического производства. К недостаткам этих корпусов следует отнести их относительно малую прочность, нагрузки на корпус передаются кристаллу, что резко снижает надежность ИС по сравнению с аналогичными схемами в металлокерамических и металlostеклянных корпусах.

Основные виды отказов ИС в ПК при эксплуатации ИС: обрывы внутренних проволочных соединений, коррозия металлизации, деградация электрических

параметров, – обусловлены следующими причинами:

- наличием внутренних механических напряжений в монолитной конструкции ИС из-за различия коэффициентов термического расширения (КТР) полимерной оболочки, кристалла, внутренних и внешних выводов;

- наличием ионных примесей  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и других из-за недостаточной чистоты полимерных материалов;

- относительно высокой влагопроницаемостью пластмассовой оболочки, что приводит к проникновению активных ионов из полимера непосредственно на рабочую поверхность кристалла;

- невозможностью объективного контроля целостности оболочки монолитных конструкций ПК.

Последняя причина является наиболее существенной, так как в процессе производства ИС в ПК испытывают значи-

тельные механические и тепловые нагрузки (обрубка и сгибание выводов, лужение выводов, термоциклирование и др.), что может приводить к появлению микротрещин, сквозных каналов и других дефектов, выявлять которые визуалью очень трудно. В результате повышается интенсивность отказов ИС.

Источником усилий, воздействующих на схему в процессе ее производства, являются различия в температурных коэффициентах расширения отдельных элементов схемы. При достаточно высоких температурах, при которых ведутся отдельные этапы производственного процесса (присоединение элементов – 175 °С, приварка внутренних проводников – 150 °С, заливка корпусов – 175°С и пр.), различия в коэффициентах расширения могут создавать существенные усилия. Это может сказаться и на проценте выхода

годных схем в производстве, и на их надежности. В принципе эти усилия могут влиять на физические свойства кремниевого кристалла, смещая электрические характеристики ИС, увеличивая пределы допусков на изменения электрических характеристик и на возможность обрывов внутренних соединений или повышения токов утечки между элементами схемы.

В зависимости от размера кристалла при испытаниях на температурные циклы с изменениями температуры от –65 до +150 °С данные по отказам ИС в пластмассовых корпусах представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6.

Размеры кристалла, мм	Количество термоциклов	Процент от при температурах 65/150 °С
-----------------------	------------------------	---------------------------------------

5 × 5	500	0, во отказов возрастает и при увеличении 0, размеров кристалла. 0, 0
	1000	
	1500	
	2000	
7,5 × 7,5	500	0/40 0. В последнее время наиболее широко 5, применяются стеклокерамические корпуса 5, (СКК) чашечного типа, обеспечивающие 1, высокую надежность ИС. Кристалл и про- 6, волочные соединения размещены во внут- 16, ренней полый зоне, что значительно сни- 23, жает долю отказов ИС из-за обрывов. Од- нако герметизация СКК происходит при довольно высокой температуре (порядка 450 °С) в течение 7 – 10 мин. Например, исследования показали, что воздействие указанного режима герметизации на ИС с диодами Шоттки на основе алюминия приводит к возрастанию прямого напря- жения от 10 до 40 мВ. Это снижает выход годных по электропараметрам ИС на 5 – 10 % по сравнению с теми же ИС, герме-
	1000	
	1500	
	2000	
10 × 10	500	
	1000	
	1500	
	2000	

#### 4.6. Корпуса чашечного типа

Из табл. 4.6. видно, что при температуре 150 °С было обнаружено больше отказов, то есть корпуса отказывали при переходе от минусовой температуры к плюсовой, а не наоборот. Из таблицы совершенно очевиден вывод, что при увеличении количества термоциклов количество отказов возрастает. Точно также количест-

во отказов возрастает и при увеличении размеров кристалла.

0, во отказов возрастает и при увеличении  
0, размеров кристалла.  
0,  
0

тизируемыми при более низких температурах. В результате повышается себестоимость их производства. Еще более чувствительны к воздействию высокой температуры герметизации ИС на основе МОП-транзисторов.

С целью повышения процента выхода годных изделий, повышения качества и надежности ИС при эксплуатации разработаны металлополимерные и керамикополимерные корпуса чашечного типа, конструкция которых выполнена аналогично конструкции стеклокерамических корпусов, с той лишь разницей, что герметизация осуществляется не стеклом, а полимером при низкой температуре (не выше 180 °С). Наличие полых зон внутри корпусов позволяет отбраковывать негерметичные ИС стандартными методами.

Чашечные металлополимерные (МПК) и керамикополимерные (КПК) корпуса состоят из основания, крышки и выводной

рамки. Основание и крышка в МПК изготовлены из алюминиевого сплава и покрыты изоляционной анодной пленкой оксида  $Al_2O_3$ , а в КПК – из керамики, применяемой для стеклокерамических (СКК) и металлокерамических корпусов (МКК).

На рабочих поверхностях основания и крышки, имеющих в центре несквозные углубления для формирования внутренней полости в корпусе, содержится слой частично отвержденного термореактивного компаунда. В процессе герметизации МПК и КПК основание, выводная рамка и крышка совмещаются, и при температуре не выше 180 °С происходит полное затвердевание компаунда с образованием узкого полимерного шва площадью не более 0,8 см<sup>2</sup>. Внешние выводы МПК и КПК проходят сквозь полимерный шов. В качестве термореактивного компаунда применен порошкообразный эпоксидный полимер. Его достоинства: высокая влагостой-

кость, обусловленная более низкими, чем у других полимеров, коэффициентами сорбции, проницаемости и диффузии; низкое содержание ионных примесей (на уровне лучших пресс-материалов); высокая технологичность при нанесении и герметизации; высокое содержание наполнителя, обеспечивающее необходимую вакуумную плотность полимерного материала, что позволяет проводить контроль герметичности корпусов не только жидкостным, но и гелиевым методом.

#### **4.7. Перспективные корпуса**

Надежность перспективных корпусов будет иметь весьма важное значение при обеспечении высокой надежности ИС. Перспективные схемы должны обладать большой функциональной сложностью и быстродействием. Это приводит к требованиям высокой плотности расположения

миниатюрных компонентов на кристаллах схем, малых габаритов кристаллов, большого количества выводов схем. Уже сегодня следует рассчитывать на количество выводов до 300 и выше. Такие схемы в пластмассовом плоском квадратном корпусе уже распространяются в Японии и в США. Если в начале развития ИС корпуса имели шаг выводов 2,54 мм, то начали распространяться схемы с шагом выводов 0,65 и даже 0,4 мм. Однако при уменьшении шага между выводами до 0,4 мм возникают трудности при любой конструкции выводов: шаг слишком мал и вероятность появления мостков между пайками оказывается чрезмерно большой. Резко уменьшается надежность ИС и аппаратуры, увеличивается частота ремонтов печатных плат во время изготовления, затрудняется ремонт и усложняется эксплуатация аппаратуры.

На рис. 4.5 показана зависимость между площадью корпуса ИС (в  $\text{мм}^2$ ) и количеством выводов из корпуса для разных расстояний между центрами выводов для различных типов корпусов. Выбирая нужный тип корпуса, можно существенно повысить число выводов. Выбирая нужную конструкцию корпуса, можно также существенно влиять на величину задержки, например, уменьшая ее от 1 нс/см до 0,05 нс/см.

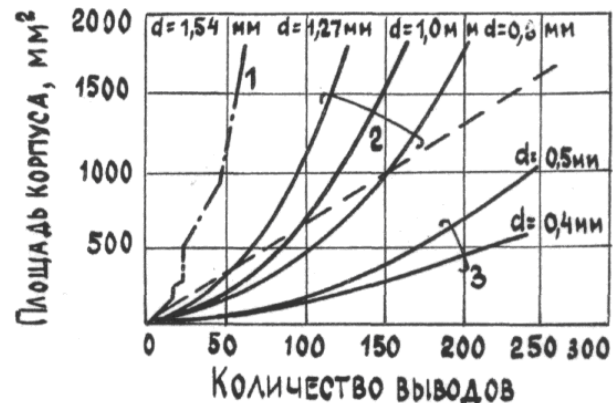


Рис. 4.5. Зависимость между площадью корпуса и количеством выводов из корпуса для разных расстояний между центрами выводов для корпусов ДИП (1), стандартных плоских корпусов (2), плоских корпусов с малым шагом (3)



В последние годы начали интенсивно развиваться многокристальные корпуса. Разрабатывается много видов и форм многокристальных корпусов (рис. 4.6). Основные проблемы, которые приходится решать при разработке этих корпусов, это обеспечение малых задержек сигналов и облегчение теплоотвода от кристаллов. Этапы развития корпусов для ИС показаны на рис. 4.7, 4.8.

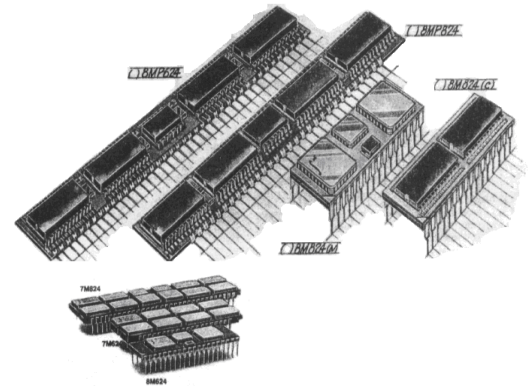


Рис. 4.6. Примеры разнообразия многокристальных корпусов

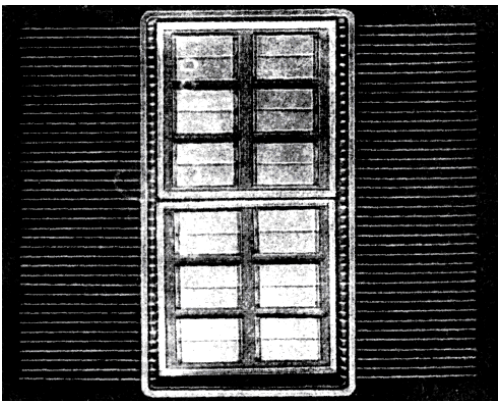


Рис. 4.7. Многокристальный носитель на  
кремниевой  
или тонкопленочной подложке

По мере перехода от монтажа в сквозные отверстия к монтажу на поверхность плат число выводов растет.

Носитель (рис. 4.7) позволяет обеспечить более высокую плотность размещения межсоединений, чем в случае печатных плат или тонкопленочных гибридных ИС.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие требования предъявляются к корпусам ИС?
2. Чем отличаются требования изготовителей корпусов и изготовителей ИС к конструкции ИС?

3. Какие существуют ограничения по пяти группам параметров к корпусам ИС?

4. Как подсчитать необходимое число выводов корпусов для разрабатываемой ИС? Приведите пример.

5. Каковы тенденции развития требований к материалам корпусов?

6. Какая существует классификация корпусов по технологии изготовления и используемым материалам?

7. Какие материалы используются для металлокерамических корпусов?

8. Охарактеризуйте металлокерамические корпуса.

9. Какие преимущества и недостатки пластмассовых корпусов?

10. Какова конструкция корпусов чашечного типа?



## 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МОНТАЖА

### КРИСТАЛЛОВ В КОРПУСА

Опыт показывает, что отказы ППИ обычно связаны с химическими, прочностными и электрическими видами отказов.

Прочностные отказы связаны с монтажом кристаллов в корпуса. Надежность ИС определяется в значительной степени качеством соединения кристалла с подложкой. Внутренние напряжения, возникающие в соединении, нередко приводят к ухудшению качества соединения кристалл – подложка и повышению теплового сопротивления перехода, а зачастую к катастрофическим отказам из-за появления трещин в кристаллах, связанных с их механической прочностью, после крепления кристалла на основание корпуса. Если для

ИС малой степени интеграции вопрос о разрушении кристалла практически не стоял, то в настоящее время только у потребителей доля отказов ИС средней степени интеграции по этому виду брака составила: на входном контроле – 10,5 изделий, при производственных испытаниях – 0,65 изделий, а для ИС 3 – 5 степени интеграции на входном контроле – 267,2 изделий и при испытаниях РЭА – 127,6 изделий на миллион поставленных.

#### 5.1. Наклейка кристаллов

Основные требования, предъявляемые к клеевым соединениям: механическая прочность, высокая адгезионная способность (не менее 2 – 3 МПа) и стабильность электроизоляционных свойств в интервале рабочих температур (удельное объемное сопротивление не менее  $10^{14}$  Ом·см,  $\text{tg } \delta \leq 10^{-3}$ ). Кроме того, газовыде-

ление клеевого шва в герметизированных объемах при температурах эксплуатации не должно содержать агрессивных компонентов, вступающих в реакцию с элементами кристалла.

В процессе наклейки кристаллов ИС в них возникают внутренние механические напряжения. Если пренебречь деформацией изгиба, возникающей при склейке, то оценочная формула для расчета напряжений, возникающих в приклеиваемом элементе, может быть представлена в виде:

$$\sigma = \frac{E_1 \alpha_2 h_2 (\alpha_1 - \alpha_2) (T_c - T) + W + E_3 h_3 (\alpha_1 - \alpha_3) (T_c - T)}{E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3} \quad (5.1)$$

где  $E_1, E_2, E_3$  – модули упругости материалов кристалла, клеевой композиции и дна основания корпуса соответственно;  $h_1, h_2,$

$h_3$  – толщина кристалла, клеевой композиции и дна основания корпуса соответственно;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – температурные коэффициенты линейного расширения материалов кристалла, клеевой композиции и дна основания корпуса соответственно;  $T$  – температура, для которой вычисляются напряжения;  $T_c$  – температура полимеризации клеевой композиции;  $W$  – величина усадки клеевой композиции при полимеризации.

Вычисленные по формуле (5.1) напряжения, возникающие в кристалле ИС серий 106, 134, равны:  $\sigma = 180,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 = 180,8 \text{ МПа}$  при применении в качестве клея ВК-32-200 ( $E_2 = 2 \text{ ГПа}$ ,  $h_2 = 100 \text{ мкм}$ ,  $\alpha_2 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ ) при посадке кристалла ИС ( $E_1 = 167 \text{ ГПа}$ ,  $h_1 = 300 \text{ мкм}$ ;  $\alpha_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ ) в корпус 401.14-1 со стеклокерамическим дном ( $E_3 = 117,6 \text{ ГПа}$ ,  $h_3 = 600 \text{ мкм}$ ,  $\alpha_3 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ ).

Аналогичным образом определено напряжение на кристалле ИС при наклейке в корпус 401.14-4 (с коваровым дном) клеем ВК-32-200 ( $\sigma = 105,9$  МПа) и контактолом КВ-3 ( $\sigma = 88,2$  МПа). Рассчитанные значения напряжения составляют 46 % для ВК-32-200 и 22 % для КВ-3 от предельных значений напряжений при изгибе кристаллов ИС серий 106,134 ( $\sigma = 392$  МПа).

## 5.2. Напайка кристаллов

Свойства соединяемых материалов, температурные условия формирования соединений и геометрические размеры определяют внутренние механические напряжения, которые могут приводить к разрушению изделия в местах соединений.

Рассмотрим проблему обеспечения надежного крепления кремниевого кристалла с подложкой из меда. Пусть кристалл, имеющий размеры  $a \times a \times h_1$ , напай-

вается на подложку толщиной  $h_2$ . Деформацией внутри контакта можно пренебречь, поскольку  $h_1$  и  $h_2$  значительно меньше  $a$ . Силы и моменты, действующие внутри кристалла, можно рассматривать только в двух плоскостях.

На рис. 5.1 условно показаны силы и моменты, действующие внутри объема соединения, состоящего из металла и кремния. Эти силы и моменты одинаковы относительно осей  $X$  и  $Y$  вследствие того, что рассматривается элемент квадратной формы. На поверхности контакта действуют силы

$$dF_i = \frac{F_i}{a} dx,$$

которые приводят к появлению момента

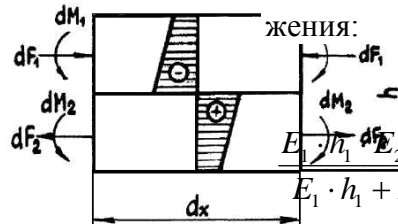
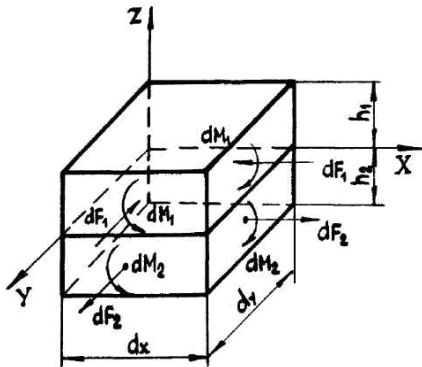
$$dM_i = \frac{M_i}{a} dx \text{ при } i = 1, 2.$$

С учетом условий, сформулированных ранее,

$$dF_1 = dF_2 = dF \quad \text{и} \quad dF/2 \cdot (h_1 + h_2) = dM_1 + dM_2$$

Окончательная формула для расчета моментов, возникающих в объеме соединения кристалл – подложка, выглядит следующим образом:

$$M_i = \frac{E_i \cdot I_i}{(I_i - \mu_i) \cdot \rho}, \quad \text{для } i = 1, 2, \quad (5.2)$$



а)  
б)

Рис. 5.1. Графическое изображение сил и моментов, действующих внутри объема соединения

где  $E$  – модуль упругости;  $I$  – момент инерции для прямоугольного поперечного сечения;  $\mu$  – коэффициент Пуассона ( $\mu = 0,2 - 0,5$ );  $\rho$  – радиус изгиба.

Усилие  $F$  можно определить из выражения:

$$F = \frac{E_1 \cdot h_1 \cdot dF_2 \cdot h_2 \cdot a}{E_1 \cdot h_1 + E_2 \cdot h_2} \cdot \left[ (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_n - T) - \frac{h}{2\rho} \right], \quad (5.3)$$



где  $\alpha_1, \alpha_2$  – термические коэффициенты линейного расширения кремния и подложки соответственно;  $T_n$  – температура плавления припоя;  $T$  – рабочая температура;  $h$  – толщина кристалла и подложки, т.е.  $h = h_1 + h_2$ .

Радиус изгиба вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{2 \cdot h \cdot C_1}{3 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_n - T)}, \quad (5.4)$$

где

$$C_1 = \frac{h_1^2}{4 \cdot h^2} \cdot \left( \frac{1}{1 - \mu_1} + \frac{E_2 \cdot h_2^3}{(1 - \mu_2) \cdot E_1 \cdot h_1^3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{E_1 \cdot h_1}{E_2 \cdot h_2} \right) + \frac{3}{4}$$

$$h = h_1 + h_2.$$

Максимальное напряжение сжатия на поверхности контакта при  $z = 0$  определяется формулой:

$$\sigma_{\text{макс}} = -E_1(\alpha_1 - \alpha_2)(T_n - T)C_2, \quad (5.5)$$

где

$$C_2 = \frac{\frac{h_1^2}{h^2} \cdot \left( \frac{1}{1 - \mu_1} + \frac{E_2}{(1 - \mu_2) \cdot E_1} \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right) + \frac{3 \cdot h_1}{(1 - \mu_1) \cdot h}}{\frac{h_1^2}{h^2} \cdot \left( \frac{1}{1 - \mu_1} + \frac{E_2}{(1 - \mu_2) \cdot E_1} \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{E_1 \cdot h_1}{E_2 \cdot h_2} \right) + 3}$$

$$h = h_1 \left( 1 + h_2/h_1 \right).$$

Напряжения, возникающие на верхней поверхности кристалла, определяются как:

$$\sigma_1(Z_1 = h_1) = -E_1(\alpha_1 - \alpha_2)(T_n - T)C_3, \quad (5.6)$$

где

$$C_3 = \frac{\frac{h_1^2}{h_2^2} \cdot \left( \frac{1}{1-\mu_1} + \frac{E_2}{(1-\mu_2) \cdot E_1} \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right) - \frac{3 \cdot h_1}{(1-\mu_1) \cdot h}}{\frac{h_1^2}{h_2^2} \cdot \left( \frac{1}{1-\mu_1} + \frac{E_2}{(1-\mu_2) \cdot E_1} \cdot \frac{h_2^3}{h_1^3} \right) \cdot \left( 1 + \frac{E_1 \cdot h_1}{E_2 \cdot h_2} \right) + 1}$$

Расчеты дают для кристалла из кремния и подложки из меди следующие значения:  $\rho_{\text{макс}} = 100 \text{ мкм}$ ,  $\sigma_{1 \text{ макс}} = -350 \text{ Н/мм}^2$ . Поскольку допустимое значение величины напряжения изгиба составляет  $250 \text{ Н/мм}^2$ , в результате повышенного напряжения изгиба возникают микротрещины, которые могут приводить к отказу элемента.

На рис. 5.2. показана зависимость коэффициента  $C_1$  от отношения толщины ма-

териалов  $h_1/h_2$  для соединения кремний-медь. Минимальное значение радиуса изгиба получается при отношении  $h_1/h_2 = 1$ .

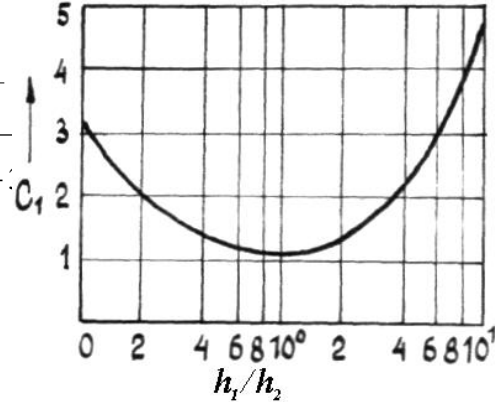


Рис. 5.2. Зависимость коэффициента  $C_1$  от отношения толщин материалов  $h_1/h_2$  для соединения кремний-медь

На рис. 5.3. показана зависимость коэффициентов  $C_2$  и  $C_3$  от соотношения толщин материалов  $h_1/h_2$  для соединения

кремний-медь. Для кривой  $C_2$  отчетливо видны относительный минимум при отношении  $h_1/h_2$ , равном 0,39, и относительный максимум в области значений  $h_1/h_2$  между 1 и 2. В области значений  $h_1/h_2 > 4$  внутреннее сжатие меньше, чем в области относительного минимума. Коэффициент  $C_3$  имеет нулевое значение при относительном максимуме коэффициента  $C_2$ .

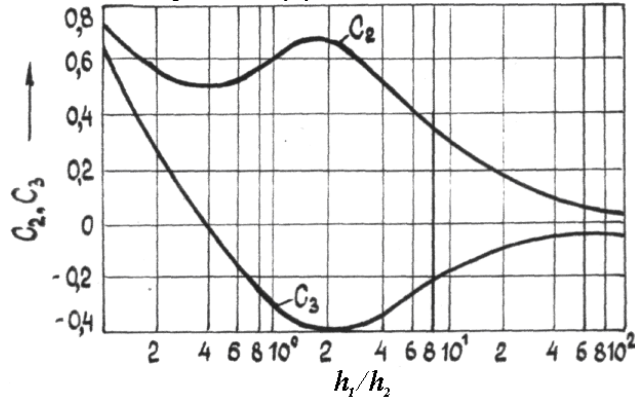


Рис. 5.3. Зависимость коэффициентов  $C_2$  и  $C_3$  от соотношения толщин материалов  $h_1/h_2$  для соединения кремний-медь

Для соединения кремний-сталь наиболее благоприятное соотношение толщин лежит в области 0,6. И хотя коэффициенты  $C_2$  и  $C_3$  достигают больших значений, ожидаемое напряжение примерно на 30 % меньше, чем в соединении кремний-медь, так как разница в коэффициентах линейного расширения у соединения сталь-кремний меньше.

### 5.3. Влияние внутренних напряжений в системе кристалл - корпус на надежность конструкции

Точное моделирование потенциально разрушительных механических и тепловых напряжений позволяет определять спосо-

бы повышения надежности как самих ИС, так и их корпусов. Разрабатывая модели, на которых имитируется влияние механических напряжений на критичные структурные элементы ИС (материалы, выводные рамки, оксидные слои, металлизацию и покрытая), можно разрабатывать технологические процессы, позволяющие уменьшить напряжения в особо чувствительных точках и таким образом свести отказы ИС к минимуму. Например, применение анализа с помощью метода конечных элементов демонстрирует важную роль точного понимания, где и почему возникают чрезмерно высокие механические напряжения в корпусе ИС. Если анализ указывает на желательность усиления структурно ослабленного корпуса путем увеличения его толщины, то инженер-разработчик корпуса должен отдавать себе отчет в том, что этот путь может привести к росту термических напряжений. С дру-

гой стороны, термические напряжения изменяются во времени и при изменении окружающих условий. Абсолютные величины механических напряжений, рассчитываемые на основе метода конечных элементов, могут не совпадать с реально действующими величинами напряжений, но характер их распределения и относительные величины, как оказалось, точно соответствуют друг другу.

Так, например, разработчики фирмы Texas Instrument создали трехмерную модель для проверки предположения о том, что в различных местах поперечного сечения ИС происходит концентрация сравнительно высоких напряжений. Сдвигающие напряжения, параллельные поверхности кристалла, достигают максимума вблизи от углов и спадают до нуля в центре кристалла (рис. 5.4). Сильная концентрация напряжений в областях размеров 0,4 мм вблизи от углов кристалла (по крайней ме-

ре, до 5 МПа) объясняет потенциальную вероятность возникновения таких отказов, как трещины в пассивирующем покрытии, появление сдвигов в металлизированных дорожках и срез шариковых выводов.

С помощью тензодатчиков установлено, что на операциях монтажа кристаллов на основание пластмассового корпуса и термокомпрессионных соединей внутренних выводов возникают механические напряжения порядка 100 МПа. При этом для клеевых соединений кристалла с основанием пластмассового корпуса характерен значительный разброс остаточных внутренних напряжений (ОВН) в диапазоне от 50 до

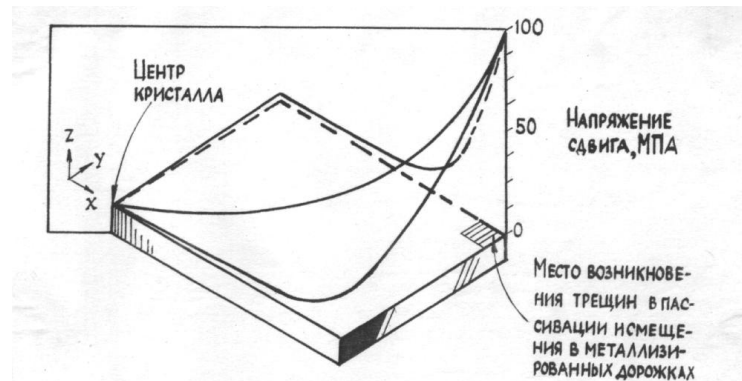


Рис.5.4. Уровень механических напряжений в кристалле

150 МПа, при эвтектической пайке разброс ОВН значительно меньше и составляет 2 - 6 МПа, что свидетельствует о большей воспроизводимости последнего процесса. При монтаже кристаллов БИС в металло-

керамические корпуса максимальные значения ОВН составляют порядка 240 МПа.

Уровень ОВН в кристаллах толщиной 0,46 мм, напаянных с помощью золотокремниевой эвтектики на подложку из керамики толщиной 0,58 мм, в 2,5 – 3 раза выше, чем в кристаллах, напаянных на подложку толщиной 1,1 мм. Основным фактором, снижающим напряженность, является утонение пластин кремния и увеличение толщины подложки до выполнения соотношения между ними 1 : 4. При этом условии происходит снижение ОВН при эвтектической пайке до 70 %.

Микропластическая деформация, протекающая как на поверхности кристалла, так и в объеме, предшествующая образованию микротрещин, происходит при напряжениях, значительно меньших теоретической прочности кристалла кремния на сдвиг. Величина разрушающих напряжений может быть на 2 порядка

ниже теоретической величины предельной прочности кремния, равной 7800 МПа.

С позиций статической теории прочности установлена зависимость прочности кристалла БИС от их площади по формуле:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_b} = \left( \frac{S_b}{S_m} \right)^{1/2\alpha},$$

где  $\sigma_m$ ,  $\sigma_b$  – прочность кристаллов БИС малых и больших размеров;  $S_m$ ,  $S_b$  – площадь малого и большого кристаллов;  $2\alpha$  – показатель плотности повреждений, определяемый экспериментально и равный для кремния четырем.

Теоретически и практически определено, что предел прочности кристаллов БИС площадью 100 мм<sup>2</sup> на 30 – 40 % ниже предела прочности кристаллов площадью 10 мм<sup>2</sup>.

В результате исследования пространственных диаграмм напря-

женного кристалла, построенных по данным тензометрии, определены следующие основные виды пустот в соединительном эвтектическом слое: краевые и эллиптические. По статистическим данным установлено, что краевые пустоты, вызывающие разрушение БИС, встречаются в 95 – 98 % случаев разрушений, на долю эллиптических пустот приходится 2 – 5 %.

Примеры поведения кристаллов БИС при разрушении от краевых пустот представлены на рис. 5.5. Массовый характер разрушений БИС, как правило, возникает в изделиях, напаянных в реставрированные корпуса, или при работе в процессе пайки кристалла перекошенным инструментом, в результате чего под кристаллом образуются пустоты значительных размеров. При-

чиной образования пустот являются также применение золотой прокладки меньших размеров по отношению к площади кристаллов и наличие оксидов на обратной стороне кристалла, препятствующих созданию качественного соединения кристалла с корпусом.

## Контрольные вопросы

1. Какие данные говорят о возрастании прочностных отказов?
2. Какие требования предъявляются к клеевым соединениям?
3. Какова оценочная формула для расчета напряжений, возникающих при наклейке кристалла на основание корпуса?
4. Где больше возникает напряжение склеивания: на стеклокерамике или на металле в корпусах типа 401.14?
5. Какова формула для радиуса изгиба кремниевой пластины при напайке на подложку из меди?
6. Какова формула максимального напряжения сжатия на поверхности контакта?

7. Какова формула напряжения, возникающего на верхней поверхности кристалла?

8. Начертите зависимость коэффициента  $C_1$  от  $h_1/h_2$ .

9. Начертите зависимость коэффициента  $C_2$  от  $h_1/h_2$ .

10. Каково влияние внутренних напряжений в системе кристалл-корпус?

11. Какая существует зависимость прочности кристаллов БИС и их площади?

12. Каково соотношение между различными пустотами, образующимися при напайке кристалла на основание корпуса?



## 6. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВНУТРЕННИХ

### СОЕДИНШЕЙ КРИСТАЛЛА С ВЫВОДАМИ КОРПУСА

#### **6.1. Методы микросварки и оценка качества сварных соединений**

Для формирования соединений кристалла с траверсами выводов корпуса в настоящее время используются в основном три способа микросварки давлением в твердой фазе: термокомпрессионная (ТКС) встык (шариком) и внахлестку, ультразвуковая (УЗС) внахлестку и термозвуковая (ТЗС) встык (шариком) и внахлестку.

Анализ материалов, применяемых для формирования сварных соединений

при данных способах сварки, позволяет выделить:

- 1) монометаллические соединения;
- 2) биметаллические соединения металлов:

образующих ряд твердых растворов (Al – Ni);

взаимная диффузия которых может приводить к образованию интерметаллических соединений (Au – Al);

3) соединения металлов, образующих между собой низкотемпературные эвтектики (Au – Si, Al – Si).

К первому типу относятся соединения типа алюминий-алюминий или золото-золото. Эти металлы обладают хорошей свариваемостью при отсутствии на соединяемых поверхностях органических загрязнений и минимальной толщине естественного оксида.

Монометаллические сварные соединения наименее чувствительны к темпера-

турным обработкам и электромиграции по сравнению с соединениями других типов. Незначительное изменение свойств при термообработках связано с изменением структуры тонких слоев (рекристаллизацией) и ростом оксидных пленок.

Из биметаллических соединений наиболее распространенными являются сварные контакты системы алюминий-золото. Золото и алюминий имеют хорошую взаимную свариваемость при отсутствии поверхностных загрязнений и толстых оксидных пленок на алюминии. Однако получаемые сварные соединения являются термодинамически неустойчивыми из-за образования в контакте этих материалов низкотемпературных интерметаллических

соединений. Данные соединения появляются уже в процессе формирования сварного соединения при ТКС и ТЗС и продолжают расти при повышенной температуре в процессе технологических обработок и эксплуатации приборов. Рост интерметаллических соединений приводит к образованию пустот на границе раздела фазы: обогащенной золотом и чистого золота, а также к увеличению объема соединения и возникновению механических напряжений между разными фазами.

К третьему типу относятся соединения проводников с полупроводниковыми материалами, например золотой или алюминиевой микропроволоки с кремнием и

германием. Данные соединения в настоящее время практически не применяются в конструкциях полупроводниковых изделий, так как не обеспечивают требуемых характеристик по технологичности и надежности соединений.

Необходимо, чтобы прочность соединения составляла определенную часть прочности проводника на разрыв или адгезии пленки с подложкой, например, не менее 20 – 30 % от прочности проводника на разрыв, а воспроизводимость качества характеризовалась коэффициентом вариации менее 20 %.

Коэффициент вариации или стабильность прочности  $\gamma$  является важнейшей характеристикой надежности сварных соединений:

$$\gamma = (\sigma/Q_{cp}) \cdot 100 \%,$$

где  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{cp})^2}{n-1}}$  – среднее квадратическое отклонение;  $Q_{cp}$  – среднее арифметическое значение усилия разрушения;  $Q_i$  – усилие разрушения  $i$ -го сварного соединения;  $n$  – число испытанных соединений.

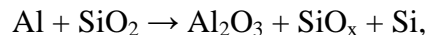
## **6.2. Причины, влияющие на свариваемость микросоединений**

Контроль контактных площадок на РЭМ доказал, что на поверхности контактных площадок ряда пластин, имеющих неудовлетворительную свариваемость, присутствуют крупные включения неправильной формы. На других пластинах, также имеющих неудовлетворительную свариваемость,

ваемость, были обнаружены остатки резистивной маски в углублениях ям микро-рельефа поверхности.

Установлено, что свариваемость ухудшается при загрязнении поверхности углеродосодержащими пленками и оксидами и становится неудовлетворительной при толщине слоя 50 – 60 нм, что характеризуется содержанием углерода более чем 40 % и связанного в соединениях кислорода порядка 15 %. Свариваемость также ухудшается при повышенной концентрации кремния в поверхностных слоях пленок Al и становится неудовлетворительной при содержании Si более 3 % в слое толщиной 50 – 60 нм. Увеличение концентрации Si в поверхностном слое пленок связано с растворением пассивирующего диэлектрического покрытия при пиролитическом способе его нанесения на алюминий, так как температура подложки при этом составляет 430 – 450 °С. Известно, что при

такой температуре за счет диффузии алюминия в пассивирующее покрытие и взаимодействия его с раствором происходит изменение состава слоя на границе раздела пленок. В результате реакции происходит образование оксидов алюминия и кремния:



а также выделение чистого Si. При удалении пассивирующего диэлектрического покрытия с контактных площадок методом травления в плазме или жидкостном травителе на основе плавиковой кислоты данный слой не удаляется полностью, так как  $\text{SiO}_x$  – слабо травится в травителе для  $\text{SiO}_2$  и ФСС. По этой причине возможны также локальные (островковые) остатки пассивирующей пленки на поверхности контактных площадок структур.

Загрязнения поверхностного слоя алюминиевой пленки приводят к умень-

шению фактической площади взаимодействия металлов в сварном соединении, при этом данные пленки действуют как смазка, ухудшая удаление оксидных пленок из зоны соединения. Увеличение концентрации кремния в поверхностном слое покрытия и наличие пленок  $Al_2O_3$  и  $SiO_x$  приводят к повышению его микротвердости, что резко ухудшает пластическую деформацию пленки алюминия при сварке и препятствует удалению с ее поверхности оксидных пленок.

Пленка Al – Si более чувствительна к поверхностному загрязнению Si, так как в исходном состоянии она содержит около 1 % Si. Кремний может выделяться на поверхности при термообработке за счет диффузии по границам зерен, так как равновесная концентрация Si в Al при 20 °C составляет 0,02 %. Так, имитация термообработки, аналогичной режимам напайки кристаллов на эвтектику Au – Si, ( $T = 450$

°C, время выдержки 2 мин), показала, что концентрация Si в поверхностном слое толщиной 20 – 30 нм увеличилась на 20 – 30 % от исходной.

6.3. Влияние легирования пленок алюминия на качество

соединений при ультразвуковой микросварке

В последнее время все больше используют легированные пленки алюминия, что позволяет увеличить среднее время наработки изделий на отказ вследствие повышения электромиграционной стойкости. Но при этом повышаются внутренние напряжения в системе пленка-подложка и удельное электрическое сопротивление. Ухудшаются свариваемость и надежность микросварных соединений типа легированная алюминиевая пленка-проволочный вывод и др. Значительно чаще, чем при

использовании нелегированных пленок, наблюдаются случаи образования в процессе УЗС сколов или так называемых фигур локального разрушения полупроводниковой подложки в местах сварки.

Если используется нелегированная пленка алюминия, то при нагрузке проводочный вывод, имеющий вследствие легирования несколько большую жесткость, вдавливается в менее жесткую алюминиевую пленку. В результате, если считать, что в начальный момент деформация вывода отсутствует, то усилие, приложенное к выводу, передается алюминиевой пленке в виде равномерной нагрузки, распределенной в пределах сектора с некоторым углом при вершине  $2\alpha$  (рис. 6.1).

Нормальное усилие или сжимающие напряжения, возникающие в подложке, будут уменьшаться в этом случае от цен-

тра соединения к его периферии по закону косинуса.

Как известно, возникновение под областью соединения в приповерхностной зоне кремниевой подложки напряжений сжатия сопровождается возникновением по периферии этой области, т.е. по границе соприкосновения вывода с алюминиевой пленкой, напряжений растяжения. Уменьшение сжимающих напряжений от центра к периферии уменьшает напряжения растяжения, возникающие на периферии соединения, что препятствует образованию фигур локального разрушения при УЗС.

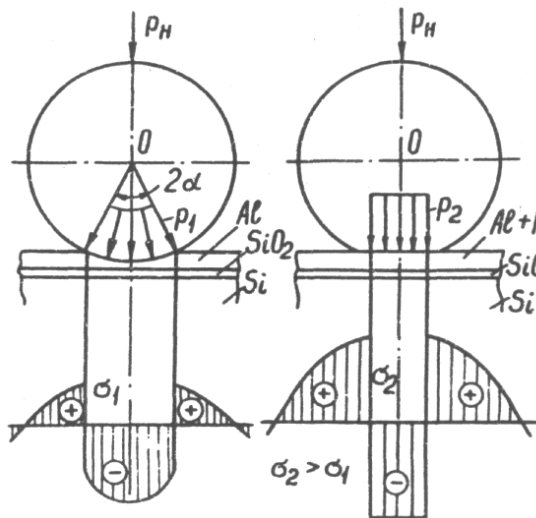


Рис. 6.1. Влияние легирования пленки алюминия на распределение нагрузки  $P_H$  по границе раздела пленка – вывод и напряжений  $\sigma$  в приповерхностных

слоях кремниевой подложки: а – нелегированная пленка;  
б – легированная пленка

Если используется легированная пленка алюминия (рис. 6.1), то вследствие увеличения ее жесткости площадь контакта пленка-вывод становится меньше и при жесткости вывода меньше жесткости пленки вывод несколько деформируется. Приложенное к выводу усилие передается алюминиевой пленке как равномерно распределенная нагрузка, направленная преимущественно по нормали к пленке. Сжимающие напряжения, возникающие в приповерхностной зоне кремниевой пластины, в особенности по периферии области контакта, в этом случае значительно больше, чем при использовании нелегированной пленки. В результате значительно возрастают также напряжения в приповерхност-

ных областях кремниевой пластины, прилегающих к зоне соединения.

При наложении поперечных УЗ-колебаний, т.е. колебаний, перпендикулярных плоскости соединения, в полупериоды совпадения знака напряжений от статической и динамической нагрузок напряжения растяжения в кремниевой пластине существенно возрастают. При малых нагрузках на инструмент амплитуда УЗ-колебаний достаточно большая, что при большой жесткости алюминиевой пленки и вывода и малой площади контакта между ними на начальной стадии образования соединения может

привести к ударному знакопеременному характеру распределения напряжений в приповерхностной области кремниевой пластины в зоне формирования соединения. Сравнительно невысокая прочность и хрупкость монокристаллического кремния увеличивают вероятность образования фигур локального разрушения.

Увеличение нагрузки на инструмент приводит, по-видимому, к взаимной деформации вывода и пленки, что увеличивает площадь контакта в особенности на начальной стадии формирования соединения. Кроме того, снижается амплитуда УЗ-колебаний, что предотвращает возможность ударного характера передачи на-



грузки на кремниевую пластину. В результате при одновременном снижении времени цикла УЗ-сварки вероятность образования фигур локального разрушения значительно снижается.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие существуют основные три способа сварки внутренних выводов?
2. Какие материалы применяют при сварке внутренних выводов?
3. Охарактеризуйте сварку монометаллических соединений.
4. Охарактеризуйте сварку биметаллических соединений.
5. Какова формула оценки коэффициента вариации?

6. Какие причины влияют на свариваемость микросоединений?

7. Как влияет легирование алюминиевой пленки и пленки алюминия на качество соединений УЗС?

8. Каковы геометрические размеры сварного соединения?

9. Каковы размеры контактных площадок под одну сварку?

10. Какова допустимая разность высот между контактными площадками кристалла и траверсами корпуса?

## **7. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ИС ОТ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗ- РЯДОВ**

Хорошо известно, какой вред приносит ППИ – полупроводниковым приборам и интегральным схемам – электростатический заряд (ЭСЗ). Аккумуляция заряда на пластинах, фотошаблонах приводит к потерям в выходе годных ППИ, так как заряженная пластина и фотошаблон подобно "пылемагниту" способны собирать частицы пыли даже в самой чистой среде. Анализ показывает, что до 65 % отказов МОП ИС на некоторых предприятиях-изготовителях ИС вызвано воздействием ЭСЗ.

Восприимчивые к электростатическим зарядам ППИ подвергаются опасности как в процессе производства, так и в процесс применения. Неантистатическая упаковка, недостаточно грамотное обра-

щение с ППИ на входном контроле, в процессе монтажа при изготовлении электронных блоков и при эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры могут быть причиной выхода ППИ из строя под действием ЭСЗ.

Сообщается, что средние ежедневные потери электронной промышленности США от ЭСЗ составляют от 10 до 100 % продукции. За год затраты, обусловленные потерями от воздействия ЭСЗ на ППИ и ремонтом или дополнительным обслуживанием оборудования, составляют около 10 млрд долларов.

### **7.1. Природа возникновения электро- статических зарядов при производстве полупроводниковых изделий**

В производстве ППИ ЭСЗ чаще всего возникают вследствие трения поверхно-

стей различных материалов. Причиной возникновения ЭСЗ является передвижение свободных электронов или движение ионов в результате соприкосновения двух поверхностей, разностей диэлектрических постоянных, тепловых пьезоэлектрических эффектов и т.п. Если осуществить контактное соединение двух материалов трибоэлектрической серии, то наиболее высокий в серии материал заряжается положительным электричеством, другой получит такой же отрицательный заряд. Величина ЭСЗ зависит от силы сжатия при контакте и от качества контакта между материалами.

Ниже в качестве примера приведены некоторые трибоэлектрические материалы, способствующие образованию статических зарядов.

1. Бакелит
9. Целлюлоза

2. Силикон
10. Шелк
3. Поливинил
11. Хлопок
4. Полиэтилен
12. Нейлон
5. Этиловая целлюлоза
13. Стекло
6. Полистирол
14. Тефлон
7. Эпоксидная смола
15. Шерсть
8. Полиметилметакрилат (плексиглас)

В таблице 7.1 приведены величины напряжений ЭСЗ, генерируемых при трении материалов, обычно используемых в чистых помещениях полупроводникового производства.

При обычном хождении человека по земле и даже если он просто сделает дви-

жения рукой в воздухе, конденсатор, одной из обкладок которого является человеческое тело, а второй – земля, заряжается количеством энергии от 0,1 до 5 мкКл. Если подсчитать напряжение  $U = Q/C$ , принимая среднюю емкость человеческого тела равной 150 пФ, то тело человека может заряжаться до 20 кВ. При перемещении тела относительно окружающей среды емкость уменьшается в 2 раза, заряд остается неизменным, а напряжение увеличивается в 2 раза.

В табл. 7.2 приведены максимальные значения возникающих в различных случаях ЭСЗ.

Таблица 7.1

Величина ЭСЗ на предметах из различных материалов, В

Наименование предметов	Пластмассовая коробка, корпус ППИ	Полиэтиленовая упаковка	Стеклопластиковая чашка, стеклянный корпус ППИ	Металлический пинцет
Латексные напальчники	6000	8000	4000	1000
Незащищенные пальцы	200	3000	200	0

Таблица 7.2

Объект, получающий ЭСЗ	Напряж.
Человек, идущий в ботинках на каучуковых подошвах	
Человек, идущий по ковру в ботинках на каучуковых подошвах	

Человек, идущий по полу, вымощенному плиткой, в ботинках на каучуковых подошвах	быть 10,000
Человек, сидящий на рабочем месте	ППИ из 3000
Целлулоид при трении	никак 40 000
Газ, выходящий из баллона со сжатым газом	мент, 9000
Бензол и эфир при скорости истечения 3 м/с	проводяще 3000
Свободно капающий бензин	но быстрое 4000

Величина ЭСЗ оператора, идущего по рабочему помещению, зависит от пройденного расстояния или времени прохождения этого расстояния. Например, оператором достигнуто предельное напряжение ЭСЗ, равное 8 кВ, после 20 – 30 шагов. После остановки оператора наблюдается утечка ЭСЗ.

Накопление заряда человеком не является единственной причиной опасного для ППИ и РЭА электростатического разряда (ЭСР). Значительные по величине заряды могут возникать непосредственно на поверхности изделия. Такие заряды могут

быть опасными, если они накапливаются на проводящих элементах конструкции неподвижными, когда они возвышены или изолированных деталях. В момент или иной вывод касается тела, проходит исключительно импульсный ЭСР, который может полностью или частично повредить прибор.

Установлено, что в процессе работы конвейера вращающиеся фторопластовые ролики заряжаются до потенциалов порядка 3000 В, фторопластовая и пенопластовая тара может заряжаться до 8000 В, а пластмассовая – до 2500 В. Нужно помнить, что электронно-лучевые трубки телевизоров, осциллографов, дисплеев, мониторов являются источниками большого электростатического поля. Поэтому оператор, случайно коснувшись экрана трубки, может зарядиться до нескольких киловольт. Даже не касаясь экрана, оператор,

находящийся перед включенным осциллографом на некотором расстоянии, случайно коснувшись земляной шины, может приобрести значительный заряд, противоположный по знаку заряду экрана. На ППИ, находящихся вблизи экрана трубки, также будет воздействовать электрическое поле трубки.

Для описания ЭСР, которые могут привести к разрушению или отказу ППИ и РЭА, были предложены три обобщенные модели: модель тела человека (МТЧ), модель заряженного прибора (МЗП), модель воздействующего поля (МВП).

*Модель тела человека.* При сравнительно простых движениях на поверхности тела человека может создаваться значительный ЭСЗ. Когда "заряженный" человек касается ППИ, например при операции ручной сборки, то часть энергии, содержащейся на поверхности его тела, передается, т.е. разряжается на изделие или через

него на землю. В большинстве случаев в разрядном импульсе содержится достаточно энергии, чтобы изменить характеристики ППИ и даже расплавить области в материале р-n-перехода. Эквивалентная схема тела человека, используемая при описании данного явления, в общем случае состоит из последовательно соединенных емкости и сопротивления. Как правило, емкость тела берется равной 100 – 250 пФ.

Сопротивление тела человека в модели выбирается в пределах 1000 – 2000 Ом. Эта модель соответствует отдельно стоящему человеку, несущему заряд на внешней поверхности кожи. Используя данную модель, определяют порог разрушающего напряжения для ППИ. В эквивалентной схеме МТЧ обычно предполагается, что разряд попадает на один проводник, в то время как другой проводник заземлен. Хотя данная ситуация может встречаться часто, более вероятен для кор-

пусов ИС прямоугольного типа с двухрядным расположением выводов ДИП, других типов корпусов ИС с выводами и некоторых кристаллодержателей разряд на проводник, находящийся со всеми остальными проводниками незакрепленного прибора на одной поверхности. Разряд характеризуется более сильным разрушительным воздействием в случае с заземленным прибором, так как длительность импульса разряда тогда больше, поэтому энергия значительно больше рассеивается прибором.

Одной из оценок измерения разрушающего действия разряда является отношение полной плотности мощности к плотности мощности, необходимой для доведения кремния до его точки плавления.

Найдено, что данное отношение близко к 1 в случае свободно лежащего на поверхности прибора и равно примерно 10

в случае его заземления при одинаковых параметрах модели. Расчеты показывают, что в случае с заземленным прибором рассеивается приблизительно 10 мкДж энергии, которой достаточно для расплавления кремния объемом 10 мкм<sup>3</sup>.

При описании этой модели ЭСР приняты следующие допущения. Прежде всего, МТЧ довольно упрощенно представляет распределенную систему (тело человека) и в ней не учитываются коренные явления, возникающие перед самим разрядом. В модели не учтена индуктивность человека (ее величина 50 – 100 нГн), которая в какой-то степени ограничивает крутизну фронтов импульса ЭСР. Несмотря на это, результаты какой-нибудь одной испытательной ситуации можно использовать для сравнения ППИ по их пороговым уровням напряжения разрушения. Определенные таким образом пороговые уровни обладают значениями, характерными для

наихудшего случая, так как реальные разряды с определенным потенциалом почти всегда слабее, чем в испытательных системах. Реально наблюдаемый ЭСР рассматриваемого типа (МТЧ) протекает не однократно, а в виде серии последовательных разрядов при более низких напряжениях. Это явление описывается более сложной моделью, включающей помимо параметров поверхности объемные компоненты, оцениваемые значениями 100 кОм и 650 – 1000 пФ. Полную модель ЭСР сложно воспроизвести на практике, поэтому большинство национальных стандартов и отечественные стандарты предусматривают только поверхностные RC-компоненты и максимально допустимое время нарастания 20 нс.

*Модель заряженного прибора.* На приборе и на самом корпусе в его системе проводников и в других проводящих участках накапливается заряд, который затем

быстро разряжается через один из выводов. В данном случае заряд, хранящийся на металлических частях подложки и корпуса, протекает через подложку и вызывает отказы р-n-переходов, диэлектрических слоев и элементов, являющихся частью разряжаемого участка. Системы проводников прибора и корпуса в результате трения могут заряжаться электричеством так же, как заряжается тело человека. Особенно это может наблюдаться при автоматической подаче приборов путем скольжения в подводящих каналах.

Для описания переходного процесса, протекающего в разряжаемом приборе, можно применить простую эквивалентную схему, представляющую собой цепочку последовательно соединенных элементов: емкости  $C$ , зависящей от параметров окружающей обстановки, индуктивности проводников прибора  $L$  и сопротивления элемента схемы  $R$ , расположенного на



кремниевой пластине, в которой будет рассеиваться мощность переходного процесса. Эта цепочка завершается ключом, который изображает контакт с заряженным телом или землей, и некоторым контактным сопротивлением  $R_c$ .

Емкость корпуса прибора в момент касания земли играет большую роль в определении количества энергии, выделяемой при ЭСР, и в ответе на вопрос, будет ли превышено пороговое значение напряжения, приводящее к выходу из строя прибора. Накопление заряда на корпусном приборе в то время, пока он расположен вблизи земли, и при последующем перемещении от земли приведет к увеличению на нем напряжения, а также энергии, хранимой прибором. Разряд в данном случае внес бы больше разрушений, чем тогда, когда прибор находится вблизи земли. Увеличение напряжения и энергии в этом случае происходит обратно пропорцио-

нально изменению соотношения емкостей.

Например, при равных количествах выводов держателя чипов обладают значительно меньшей емкостью, чем корпуса типа ДИП с двухрядным расположением выводов, и поэтому при равных напряжениях в них содержится меньше энергии. Если прибор заряжен в результате касания с другим телом, что, вероятно, является наиболее общим случаем (например, при переносе человеком прибор заряжается в процессе выполнения этой операции), то он менее подвержен разрушению в держателе чипов, чем в корпусе типа ДИП.

Даже в случае, когда емкость прибора, в котором энергия имеет ограничения по сравнению с МТЧ, ниже, разрядный импульс может произойти настолько быстро, что выделится мощность, плотность потока которой превысит порог разрушения.

Случай МЗП можно воспроизвести

для определения восприимчивости прибора к ЭСР следующим образом: прибор заряжается через свою проводящую подложку и разряжается касанием одного из проводников. При этом детали и приспособления необходимо выбирать так, чтобы свести к минимуму любые паразитные добавочные цепи.

Случай, подобный МЗП, может возникнуть, например, при лакировке непроводящих крышек ИС методом распыления. Электрический заряд, возникающий при трении капель жидкости о крышку (трибоэлектричество), накапливается на крышке и может разрядиться на заземленную подложку.

У стираемых ультрафиолетовым освещением электрически программируемых ПЗУ с неэлектропроводными крышками корпуса в результате их охлаждения путем разбрызгивания жидкого фреона-12 через 5 – 10 с наблюдался отказ. Создана сле-

дующая модель механизмов отказа. Положительные ионы, стекающие со струи фреона на верхнюю поверхность крышки корпуса, наводят отрицательный заряд на нижней изолированной поверхности крышки. Напряженность поля, возникающего при этом, может превысить пробивную прочность воздушного зазора внутри корпуса (15 кВ/см). В случае превышения пробивной прочности в канале пробоя происходит ионизация воздуха с образованием положительных и отрицательных ионов. Положительный заряд на крышке притягивает к себе отрицательные ионы и отталкивает положительные, что приводит к образованию локализованных участков положительных зарядов на защитном диэлектрике кристалла. Эти положительные заряды притягивают электроны из кристалла и инвертируют заряд его поверхности, в результате чего может образоваться емкостная связь между стоком и каналом

через пассивирующие слои, обуславливающие утечки.

В процессе защиты полупроводниковых приборов полимерными материалами, например, лаком КО-923, компаундом 159-167, возможно заряджение поверхности кристалла, обусловленное электризацией капли защитного материала, приводящее в процессе высокотемпературного отверждения к изменению характеристик приборов. Величина заряда капли защитного материала зависит от типа применяемого материала, инструмента, потенциала оператора и достигает величины  $10^{-10} - 10^{-9}$  Кл.

#### *Модель воздействующего поля.*

Внешнее электрическое поле может воздействовать на ППИ двумя способами. Во-первых, в р-n-переходах прибора, помещенного в поле, могут создаваться потенциалы, величина которых зависит от величины разделительной емкости, находящейся между источником внешнего поля и

землей. Найдено, что при потенциалах источника до 5000 В вероятность данного события мала до тех пор, пока р-n-переход перемещающего прибора расположен между плоскостью источника поля и заземленной плоскостью при суммарном зазоре не менее 2,5 мм. Во-вторых, в присутствии поля подвижные заряды на теле прибора смещаются в стороны, разделяющие эти заряды. Если затем заземлить проводник прибора, находящегося в поле, то произойдет либо перераспределение зарядов, либо ЭСР, так как дисбаланс, созданный полем, должен быть устранен. Это в точности соответствует ЭСР, описанному в МЗП, и любое значение порога, определенное для случая МЗП, также можно отнести для случая МВП.

В практике возможен и такой случай. В результате начального касания проводника прибора при нахождении его в поле произойдет ЭСР, который создаст опреде-

ленный заряд на приборе. Если затем прибор поднять непроводящим инструментом и удалить его из поля, то создадутся условия для появления следующего ЭСР под действием МЗП. Этот случай может быть менее распространенным, однако полностью игнорировать его не следует.

## **7.2. Результаты воздействия электростатических разрядов на полупроводниковые изделия**

Наиболее типичными механизмами повреждении полупроводниковых изделий являются следующие. Первый – диэлектрический пробой, который встречается чаще всего у МОП-транзисторов и емкостей линейных биполярных ИС. Вторым связан с плавлением кремния в обедненной области р-п-перехода при локальном разогреве, при этом наиболее часто повреждаются переходы эмиттер-база п-р-

п-транзисторов в линейных биполярных ИС. Повреждение продольных р-п-р-транзисторов встречается реже.

Непосредственно перед ЭСР и в течение первых десятков наносекунд разряда на изделие действует наведенное высокое напряжение, которое является источником тока. В связи с этим на изделие действуют и потенциал электрического заряда, и ток разряда. У полупроводниковых приборов и ИС, на которые воздействовали ЭСР, могут иметь место два типа повреждений:

- катастрофические повреждения, которые обнаруживаются наиболее легко, потому что поврежденные изделия не выполняют своих функций;

- скрытые повреждения, которые затрагивают только один из параметров – усиление, утечку и т.д. или вызывают заметные изменения начальных характеристик, которые могут тем не менее не выходить за рамки допустимых отклонений.

Эти повреждения обнаружить трудно, так как зачастую они проявляются лишь в экстремальных условиях – в результате повторяющихся разрядов или со временем эксплуатации.

Катастрофические отказы ППИ из-за ЭСР можно разделить на следующие отказы: отказы под действием мощности или тока, которые часто опознают по горячим точкам или расплавленным участкам; отказы под действием напряжения, когда им пробивается насквозь диэлектрик, разрушается поверхность или возникает поверхностный дуговой разряд. Отказ перемещаемого прибора с р-n-переходом в случае МВП является по природе своей отказом под действием напряжения. Все другие модели могут вызывать или отказы по мощности, или отказы по напряжению.

Иногда возможно определение модели отказа и логическое нахождение причины отказа по месту отказа на приборе.

МТЧ почти всегда приводит к разрушению или отказу под действием мощности или под действием напряжения вблизи вывода, которого коснулись, и со стороны выводов схемы.

Отказы под действием мощности или тока, характеризующиеся МЗП, происходят обычно между схемной частью и землей или питающей шиной. Шины питания и заземления, как правило, являются проводниками с наибольшей площадью и способны хранить наибольший заряд и высвободить при разряде наибольшую энергию. Отказы внутри прибора под действием напряжения происходят из-за разницы постоянных времени разряда в смежных или пересекающихся участках, что приводит к появлению напряжений, превышающих электрическую прочность диэлектрика.

В МОП-приборах затворный оксид обычно имеет толщину 1000 Å. В от-

дельных конструкциях, например, в радиационно стойких приборах, эта изоляционная пленка еще тоньше. Пробой оксида происходит при полях  $(8 - 10) \cdot 10^6$  В/см, что соответствует приложенному к затвору напряжению 80 – 100 В.

Если появляется электрическое поле, напряженность которого превышает критическую для этой оксидной пленки величину, пленка пробивается. Отдельные типы МОП-приборов являются более чувствительными к их воздействию, что обусловлено либо толщиной пленки, либо топологией кристалла, в которой имеются острые углы или кромки металлизации, на которых возникают локальные увеличения градиента напряженности поля. Например, ВМОП-приборы из-за особенностей своей геометрии более чувствительны к ЭСР, чем другие типы МОП-приборов. Пробой может происходить не только в оксидной

пленке затвора, но и в других местах, например на перекрещиваниях пленок металлизации, где тонкая пленка диэлектрика, изолирующая один слой металлизации от другого, подвергается воздействию больших напряженностей электрического поля. ЭСР может также вызвать скрытые дефекты, появляющиеся в виде отказов в период эксплуатации. Такие дефекты можно разбить на три категории:

- нанесенный ущерб настолько мал, что прибор полностью соответствует паспортным характеристикам. Вероятность безотказной работы в течение всего срока службы достаточно велика;

- поврежденный элемент прибора соответствует техническим условиям либо слегка выходит за установленные пределы и вполне способен выполнять свои функции в системе. Однако имеется достаточная вероятность преждевременного отказа;

- прибор работоспособен, но не со-

ответствует всем предъявленным к нему требованиям. Надежность прибора существенно ослаблена.

По физическому принципу скрытые дефекты, вызванные ЭСР, можно также разделить на следующие группы.

*Дефекты оксида.* Прежде всего, это проколы, приводящие обычно либо к короткому замыканию, либо к образованию диодов Шоттки. В некоторых случаях подобные дефекты могут в течение длительного времени оставаться незамеченными и проявляться лишь при значительном повышении температуры. Другим типом дефектов является захват заряда оксидом, что приводит к сдвигу пороговых напряжений транзисторов типа МДП и к образованию паразитных каналов утечки.

*Дефекты металлизации,* проявляющиеся в виде выброса металла. В результате таких дефектов могут возрасти токи утечки либо появиться короткое замыкание.

В некоторых случаях возникающие проводящие перемычки могут не влиять на нормальную работу схемы и даже исчезают (плавятся) при перегрузках по напряжению. Несмотря на это, считается, что дефекты подобного рода по большей части сокращают срок службы приборов, в частности потому, что делают их более восприимчивыми к импульсным перегрузкам во время эксплуатации.

*Дефекты, связанные с расплавлением объемных участков кремния,* не влияющие на выходные параметры ППИ. Примером такого дефекта является пробой диффузионного резистора в месте соединения с алюминиевой дорожкой. Импульс ЭСР может проплавить дорожку из алюминия через диффузионный резистор.

Обнаружено также, что ЭСР может приводить к возникновению дефектов термоупругости, которые могут быть причиной деградации характеристик ППИ.

Анализ биполярных ИС получивших повреждения из-за ЭСР показывает, что у 90 % схем были повреждены переходы, у остальных 10 % была повреждена металлизация. Одновременно у 27 % схем имел место пробой диэлектрика.

Отрицательное влияние ЭСР в первую очередь сказывается на МОП и КМОП-приборах. Однако перечень полупроводниковых изделий, особо чувствительных к воздействию ЭСР, не ограничиваем указанными типами. Некоторые биполярные приборы также чувствительны к ЭСР. По вине ЭСР в цифровых ИС наблюдалась деградация входных диодов. Особенно опасны ЭСР для ТТЛ ИС с барьером Шоттки, которые пробиваются при энергии ЭСР в 2 – 3 раза меньше, чем необходимо для пробоя обычных ТТЛ ИС. Это происходит вследствие меньших размеров барьера Шоттки. В табл. 7.3 приведены пороги чувствительности полупроводни-

ковых приборов и ИС.

Таблица 7.3

Тип ППИ	Порог чувствительности
МОП-транзистор	100-2
Арсенидогаллиевый транзистор	100-2
Полевой транзистор с р-п-переходом	140-1
Биполярный транзистор	380-7
КМОП ИС	250-3
Линейные биполярные ИС	190-2
ИС ТТЛ	1000-2
ИС ЭСЛ	500-1
ИС ТТЛШ	500-1

Относительная чувствительность различных типов ППИ к ЭСР выглядит следующим образом (табл. 7.4):

Таблица 7.4

Тип ИЭТ	Относительная
---------	---------------



	чувствительность к ЭСР
Стандартные ТТЛ ИС	1,0
Линейные ИС	1,3
Цифровые ИС с объединенными эмиттерами	1,8
Шоттки ТТЛ ИС	3,0
МОП ИС	3,0
КМОП ИС	4,6

Большие разбросы по порогу чувствительности объясняются его зависимостью от размеров используемых элементов ПШИ, технологии изготовления, выбора параметров, характеризующих годность ПШИ, и от их величин. Например, МОП-приборы с металлическим затвором почти в 9 раз более восприимчивы к ЭСР, чем эти же приборы с кремниевым затвором. Это происходит вследствие особенностей технологического процесса изготовления кремниевого затвора, обеспечивающих оптимальные площади перекрытия затвора и уменьшающих емкость затвора.

Повышенной устойчивостью к воздействию ЭСР обладают МДП ИС с диэлектриком затвора из  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$  по сравнению с диэлектриком из  $\text{SiO}_2 + \text{ФСС}$  (фосфоросиликатное стекло). При исследовании биполярных ТТЛ ИС с изоляцией р-п-переходом (серия 133) и оксидом (серия 106) по результатам сравнительных испытаний на надежность выявлено, что ИС с оксидной изоляцией обладают большей стойкостью к ЭСР (табл 7.5).

Таблица 7.5

Результаты сравнительных испытаний ИС на надежность в течение 1500 ч при условии  $C = 200$  пФ,  $R = 1$  кОм

Потенциал воздействия заряды, В	Тип ИС			
	1ЛБ061		1ЛБ33	
	Кол-во ИС в партии, шт.	Кол-во отказов, шт.	Кол-во ИС в партии, шт.	Кол-во отказов, шт.

Без воздействия (контрольная партия)	20	0	20	Диоды	$10^{-5}$	10
				Выпрямители	$10^{-4}$	10
				Диоды Зенера	$10^{-3}$	10
				Транзисторы средней мощности	$10^{-2}$	10
				Мощные транзисторы	$10^0$	10
				Мощные диоды и кремниевые управляемые диоды	$10^1$	10
1000	16	1	20			
1500	16	1	20			
1800	11	1	20			
2000	8	1	20			

Значения энергии ЭСР, необходимой для повреждения и разрушения ППИ, различны и зависят от их конструктивно-технологических особенностей (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Энергия ЭСР, необходимая для повреждения ППИ

ППИ	Энергия, Дж, необходимая для	
	повреждения	разрушения
Дополняющие МОП-структуры	$10^{-7}$	$10^{-6}$
Транзисторы	$10^{-6}$	$10^{-5}$

Наиболее часто наблюдаемым видом повреждения КМОП ИС являются пробой оксидной изоляции вентилях и короткие замыкания их, возникающие либо из-за приложения избыточного электрического напряжения непосредственно к выводам, либо из-за приложения наведенного избыточного напряжения. Этот вид повреждения характерен и для повреждений при воздействии ЭСР. Экспериментальная проверка электрической мощности КМОП-схем серии 4011, изготовленных четырьмя

различными предприятиями при приложении импульсного напряжения между различными выводами схем показала существенное различие в электрической прочности ИС разных изготовителей, а также зависимость прочности от того, к каким выводам ИС прикладывалось напряжение.

Потенциалы, при которых начинались заметные изменения вольт-амперных характеристик (ВАХ), имеют значительно меньшие величины, чем потенциалы, приводящие к катастрофическим отказам ППИ. Наиболее чувствительным к ЭСР является БИС КР1005ВИ1, значение допустимого потенциала по техническим условиям равно 30 В. Потенциалы статистического заряда +500 В и -700 В относительно «земляного» вывода ИС могут приводить к изменению ВАХ испытуемых переходов. Под действием ЭСР порядка 1000 В независимо от знака практически любой переход интегральной микросхемы

КР1005ВИ1 может быть выведен из строя.

На рис. 7.1 – 7.2 показаны типичные ВАХ ИС до и после воздействия на них ЭСР. Из графиков видно, что характеристики элементов после воздействия на них ЭСР отличаются от первоначальных значений.

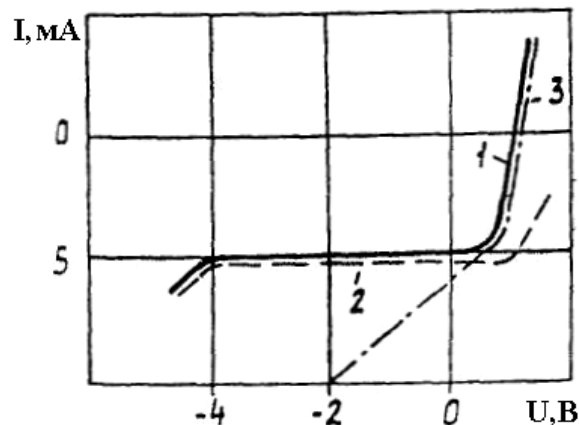


Рис 7.1. Вольт-амперные характеристики гибридной

микросхемы ГК19-П (по выводам 2 – 4, 2 – 5, 4 – 5):  
1 – до воздействия ЭСР; 2, 3 – после воздействия ЭСР

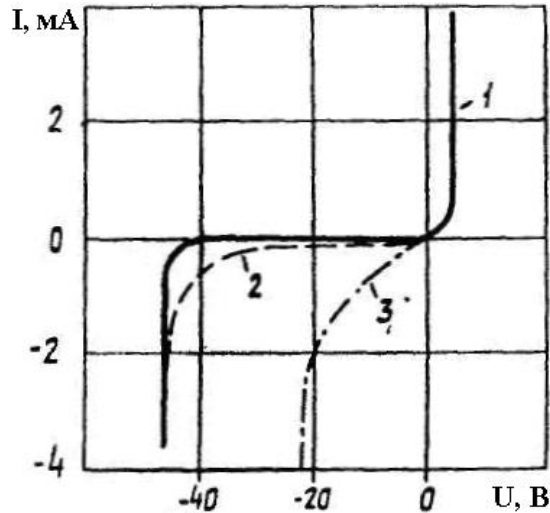


Рис 7.2. Вольт-амперные характеристики БИС КР1005ВИ1

(по выводам 10 – 39): 1 – до воздействия ЭСР;  
2, 3 – после воздействия ЭСР

В процессе эксперимента была поставлена задача – выявить особенность поведения наименее стойкого к ЭСР изделия – ИС КР1005ВИ1 при многократных воздействиях разрядов. На рис. 7.3 по оси абсцисс приведено напряжение, по оси ординат количество ЭСР при данном напряжении, после которого наступает катастрофический отказ ИС. Высота столбиков – это количество случаев катастрофических отказов при данных условиях. Видно, что распределение количества отказов в зависимости от напряжения разряда в первом приближении подчиняется экспоненциальной зависимости.

Таким образом, для ИС типа КР1005ВИ1 опасность представляет не только однократное воздействие ЭСР

больших потенциалов, но и многократное воздействие низких потенциалов.

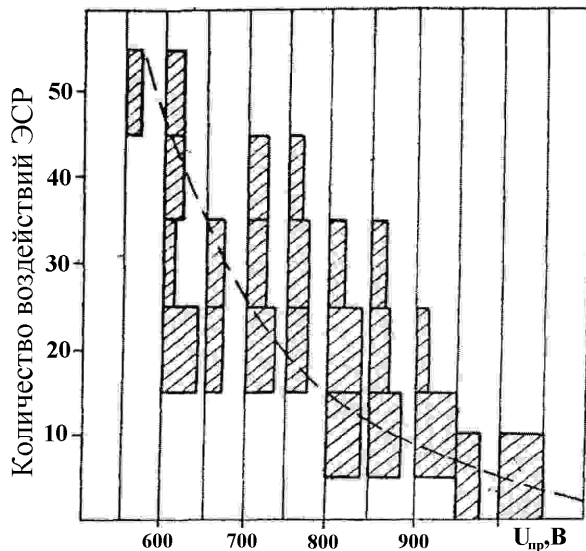


Рис. 7.3. Зависимость количества разрядных импульсов ЭСР, приводящих к катастрофическим отказам БИС КР10005ВИ1, от напряжения ЭСР

### 7.3. Коллективные и индивидуальные меры защиты от воздействия статических зарядов

Защита ППИ от ЭСЗ обычно проводится в двух направлениях: исключение факторов, приводящих к генерации ЭСЗ, и стекание накопленного заряда. Методы защиты от ЭСЗ, применяемые в полупроводниковой промышленности, подразделяются на химические, физико-механические и конструктивно-технологические. Первый и второй методы способствуют предотвращению возникновения статического электричества и ускорению стекания зарядов, третий – только защищает ППИ от опасных воздействий ЭСЗ, но не оказывает влияния на стекание зарядов.

Известно, что ЭСР происходит, ко-

гда запасенная энергия превысит пороговый уровень, соответствующий  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  Кл/м. Для предотвращения опасности целесообразно обеспечить уменьшение запасенной энергии ЭСЗ. Пути утечки ЭСЗ возможны через коронный разряд, объемную проводимость материала, на котором скапливается заряд, и поверхностную проводимость материала.

Следовательно, наиболее общими решениями проблемы борьбы со статическим электричеством являются ионизация воздуха, а также увеличение поверхностной и объемной проводимости материалов. Практические методы обычно состоят в создании организованных путей утечки ЭСЗ так, чтобы не допустить попадания опасных потенциалов на ППИ.

Первым из таких методов является *метод заземления*. Цепь утечек на землю

работает удовлетворительно, если ее сопротивление не превышает  $10^6$  Ом. Заземление является эффективным только для материалов, имеющих удельное сопротивление не более  $10^{10}$  Ом·м. Изолятор с удельным сопротивлением свыше  $10^{14}$  Ом·м может хранить высокую энергию ЭСЗ, что приводит к разряду при его связи с землей. Такой изолятор следует защищать другими способами. Заземленные электростатические проводники должны быть защищены от других проводников.

Второй метод заключается в *подавлении* ЭСЗ, так как заземление не позволяет эффективно снимать заряды с поверхности диэлектриков, которые широко применяются в чистых комнатах. ЭСЗ у таких материалов резко снижается при увеличении влажности воздуха (табл. 7.7), однако при этом ухудшаются условия работы в

чистых комнатах. Поэтому влажность устанавливается равной 40 %.

Таблица 7.7

Влияние относительной влажности воздуха на электризацию некоторых объектов

Объект	ЭЗС (В) при относительной влажности воздуха, %	
	10 – 20	65 – 90
Рабочий: при ходьбе по ковру	35000	1500
при хождении по винипла- стовому полу	12000	0,0250
при сидении на рабочем месте	6000	100
Полиэтиленовый конверт для хранения документов	7000	600

Для разрядки диэлектрических поверхностей применяют ионизаторы возду-

ха, способные генерировать ионы обеих полярностей. Такие ионизаторы используются для локальной нейтрализации зарядов непосредственно на рабочих местах или ими дополняют вентиляционные системы чистых комнат для ионизации зарядов в потоке отфильтрованного воздуха с целью общей нейтрализации стен, потолков, поверхностей оборудования и др.

Предложено облицовывать стены, потолок и пол чистых комнат электропроводящими материалами, имеющими по отношению к земле сопротивление порядка  $10^7$  Ом, при котором заряды на них уменьшаются до безопасных значений в течение 0,0250 с. Третий метод уменьшения электростатической опасности заключается в *применении токопроводящих материалов* путем смешивания материалов с металлическими или углеродными частицами.

В помещениях, где расположена аппаратура с чувствительными к ЭЗС компонентами, полы должны быть покрыты про-

водящими коврами. Ковры предназначены, прежде всего, для рассеивания ЭСЗ с лиц, входящих в помещение перед тем, как они подсоединяются к заземлению. Они также создают "заземленный" фон во всем помещении. Проводящие ковры обычно изготавливаются из пластмасс, насыщенных углем, или проводящего винилового материала. Ковер подсоединяется к заземлению.

Столы, рабочие места также должны иметь проводящее покрытие из пропитанного углем пластика, проводящего дивинила или антистатического материала. Эти покрытия обычно заземляются с помощью шин, прокладываемых на столах под покрытием. Аналогичные покрытия должны иметь и стулья.

Перчатки или напальчники из обыкновенной, непроводящей резины могут быть источником ЭСЗ. Их нужно изготавливать из специального электропроводящего материала.

При выборе материалов особое вни-

мание уделяется их свойствам рассеивать ЭСЗ. Вместе с тем важной характеристикой материала является время рассеяния заряда при заземлении. В проведенных исследованиях на различные материалы подавался потенциал до 5000 В, после чего материал заземлялся и замерялось время достижения напряжения 500 В (табл. 7.8).

Таблица 7.8

Время рассеяния ЭСЗ различных материалов

Наименование материала	Состояние материала	Время рассеивания
Антистатическая полиэтиленовая пленка	новая бывшая в употреблении	0, 21
Статическая защитная пленка	новая бывшая в употреблении	< 0,0 < 0,0
Черная проводящая пленка из ткани	новая бывшая в употреблении	< 0,0 < 0,0



Четвертая группа методов обеспечивает *уменьшение ЭСЗ тела человека*. Для этого используются заземление и антистатическая одежда.

Проводящие браслеты являются одним из наиболее эффективных средств рассеяния ЭСЗ, накапливающегося на человеческом теле. Они создают электропроводный путь, по которому ЭСЗ может стекать на землю. Браслет состоит из проводящей полосы, укрепляемой на запястье, и пряжки, которой браслет соединяется с заземленным проводом (рис 7.4). Провод должен иметь последовательно соединенное сопротивление от 1 до 100 МОм для создания безопасных условия работы, чтобы протекающий через человеческий организм ток не превышал 1 мА. Конструкция браслетов может быть разнообразной. Для ежедневной оценки качества браслетов используются тестерные боксы, расположенные при всех входах на производственный участок. Они оборудованы лампочками, указывающими состояние брас-

летов: РАЗМКНУТО, ЗАМКНУТО, ХОРОШЕЕ.

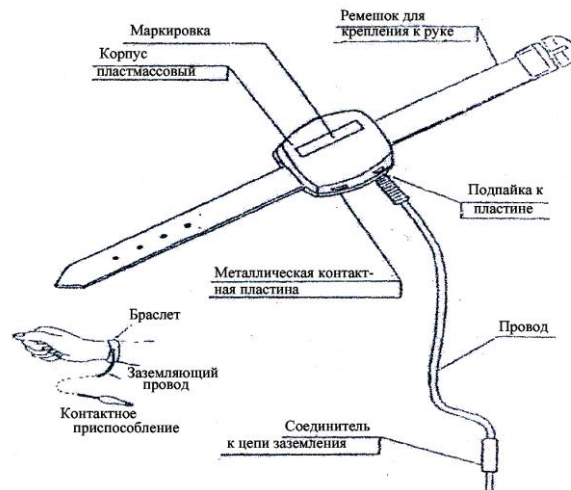


Рис 7.4. Пример конструктивного оформления

антистатического браслета

Для обеспечения заземления тела человека используются коврики из токопро-

водящих пластмасс и токопроводящая подошва обуви. Одежда человека может генерировать и сохранять ЭСЗ до 20 кВ, поэтому необходимо обращать внимание, чтобы персонал, работающий с чувствительными к ЭСЗ ППИ и электронными блоками, был одет в антистатическую одежду.

#### **7.4. Конструктивно-технологические методы повышения стойкости ИС к воздействию ЭСР**

Кроме применения внешних мер защиты, за последние годы разработаны методы защиты ИС конструктивно-технологического типа и внутренней, т. е. встроенной защиты.

Например, предложен следующий способ защиты ИС от воздействия ЭСЗ человеческого тела во время монтажа на печатную плату. На внешней стороне осно-

вания корпуса прибора сформирован ряд углублений, внутри которых находится припой. Каждое углубление соединено сквозным отверстием с контактной площадкой на внутренней стороне основания корпуса. Таким образом, внешние выводы схемы оказываются утопленными внутрь основания корпуса, что практически исключает касание их руками оператора при монтаже.

Применение ряда конструктивных особенностей при разработке топологии кристалла ИС может повысить устойчивость ИС к ЭСЗ. В частности, хороший эффект получается при увеличении расстояния между областью эмиттерной диффузии и базовым контактом, например при увеличении его с 10 до 40 мкм, или путем снижения плотности тока в эмиттере за счет увеличения его периметра со стороны базового контакта. С целью уменьшения концентрации электрического поля и на-

копления ЭСЗ на углах контактных площадок ИС предлагается указанные площадки изготавливать в виде восьмиугольника.

Тенденции к снижению глубин залегания переходов, уменьшению толщины подзатворного оксида и толщины разводки увеличивают вероятность повреждения устройства электростатическим разрядом. В первую очередь повреждаться будет тонкий подзатворный оксид входных и выходных КМОП-структур и связанная с ними металлическая разводка. Если в качестве контактов используются силициды металлов, это также ухудшает защищенность схемы от ЭСЗ. В этом случае имеются специальные схемотехнические и технологические решения, в частности, блокировка силицида, что усложняет технологический процесс и увеличивает стоимость изготовления.

Для повышения стойкости ИС серии K1500 (схемы эмиттерно-связанной логики) приняты следующие конструктивные меры: исключено пересечение шин, оптимизированы конструкция входного ограниченного резистора, расположение контактов к подложке кристалла и трассировка входных шин. Это позволило повысить стойкость этих схем к ЭСР до величины более 1 кВ.

Отдельные типы МДП ИС являются более чувствительными к ЭСР, что обусловлено либо толщиной или составом подзатворного диэлектрика, либо топологией кристалла, в котором имеются острые углы или кромки, на которых возникают локальные увеличения напряженности поля.

Экспериментально показано, что МДП ИС с диэлектриком затвора из  $\text{SiO}_2$  + ФСС менее устойчивы к воздействию ЭСР, чем схемы с диэлектрическим затво-

ром из  $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ . КМДП ИС с поликремниевым затвором являются не только вариантом схем с большим быстродействием по сравнению со схемами с металлическим затвором, но и более защищенными от воздействия ЭСР.

Исследования влияния сопротивления контактов в МОП ИС в последовательной цепи прохождения ЭСР показали, что при увеличении сопротивления цепи стойкость ИС по отношению к воздействию разряда растет. При увеличении расстояния от контактов до края перехода транзистора возрастает пороговое напряжение ЭСР, при котором схема отказывает. Увеличение толщины пленки металлизации также повышает стойкость ИС к воздействию ЭСР.

### **7.5. Методы встроенной защиты ИС от воздействия ЭСР**

Для обеспечения высокого быстродействия и повышения плотности упаковки элементов на кристалле (перспективные ИС будут иметь до 2 млн. элементов на кристалле) приходится резко уменьшать размеры элементов ИС. Если в широко известной КМОП ИС серии 4000 использовался основной размер 7 мкм, то в современных ИС – 1,5 – 1,0 мкм и уже разработаны ИС с основными размерами 0,8 – 0,5 мкм. Эти схемы в ближайшие годы будут стандартными.

Толщина пленки подзатворного оксида в КМОП и МОП ИС также непрерывно уменьшается. В схемах серии 4000 толщина подзатворного оксида составляла 1150 Å, в настоящее время она практически достигла 100 – 70 Å. Так как подзатворный оксид имеет прочность только порядка 1000 В/мкм, то в соответствии с уменьшением геометрических размеров элементов ИС снижается и пробивное на-

пряжение: со 100 В понизилось до 30 и даже 20 В. ИС стали и будут в дальнейшем все более чувствительными к ЭСР.

Эффективным средством защиты цепей от пробоя являются специальные схемы, реализуемые на кристалле ИС и служащие для шунтирования входного сигнала, превышающего обычный допустимый уровень.

Входные и выходные контакты ИС проектируют со схемой защиты на кристалле, которая обеспечивает отвод тока разряда и предотвращает появление чрезмерного напряжения на оксиде затвора или переходе.

Главным условием является то, что схема защиты не должна ухудшать характеристики защищаемого прибора. Кроме того, защитные структуры должны иметь небольшую площадь, ограничивать напряжение, подаваемое на схему, шунтировать напряжения и токи перегрузки, воз-

никающие при ЭСР, ограничивать область схемы, на которую воздействует ЭСР, иметь максимально быстрое время срабатывания и вносить минимальное время задержки в нормальную работу ИС в диапазоне напряжений питания схемы.

Основные требования к входным схемам защиты следующие: низкий порог срабатывания схемы защиты, согласуемый с защищаемой схемой, низкое динамическое сопротивление во включенном состоянии для быстрого снятия зарядов при незначительном нагреве и отсутствии повреждений или дефектов; незначительный ток утечки в режиме нормальной эксплуатации; незначительный размер площади, занимаемой схемой защиты, ненужность дополнительных технологических операций для ее изготовления.

Реализация этих требований приводит к необходимости поиска компромиссных решений между качеством защиты и

характеристиками защищаемой схемы. Например, для обеспечения низкого динамического сопротивления во включенном состоянии необходима большая площадь для схемы защиты, что может приводить к повышенным токам утечки и емкостям.

Базовый принцип защиты ИС от повреждений в результате ЭСР показан на рис. 7.5. Эквивалентная схема разрядной цепочки состоит из конденсатора  $C1$ , резистора  $R1$  и ключа  $SA1$ , подключенного к выводу ИС. Внутренняя цепь защиты состоит из ключа  $SA2$  и резистора  $R2$ .

Основная защита заключается в том, что при возникновении импульса ЭСР необходимо с минимальной задержкой замкнуть ключ  $SA2$  и шунтировать внутренние цепи ИС. При  $R2 \rightarrow 0$  имеет место 100 %-ная защита ИС, так как опасное напряжение на входе не развивается. Ключ  $SA2$  должен быть

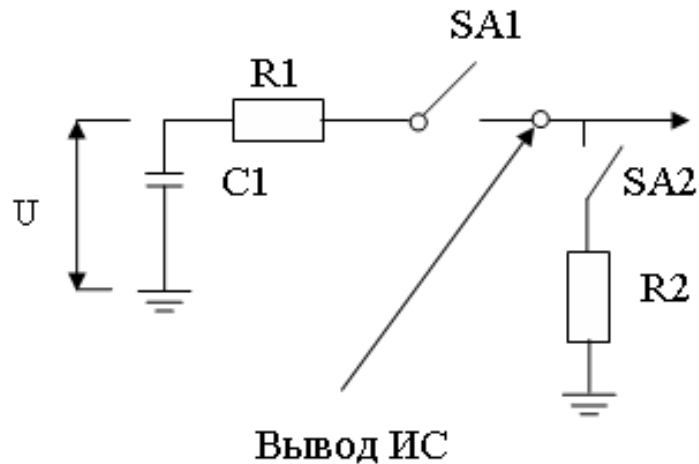


Рис 7.5. Базовый принцип защиты ИС от повреждений в результате ЭСР

двухполярным, чтобы реагировать как на положительный, так и на отрицательный импульсы. В качестве альтернативного варианта применяются две параллельные це-

почки с разнополярными ключами.

Время срабатывания устройства защиты колеблется от 1 нс для включения в прямом направлении диодов или стабилитронов до 4 нс в случае более сложных структур. Поскольку за это время напряжение на входе ИС может достичь опасной величины, применяется дополнительная фильтрация импульса ЭСР, как правило, путем включения в схему Г-образной RC-цепочки.

В зависимости от функционального назначения ИС и технологии ее изготовления может быть реализован один из следующих вариантов схем защиты: диоды с дополнительным резистором, диффузионный резистор, стабилитроны, р-канальные транзисторы, комбинация р-канальных транзисторов, разрядник, "ложный эмиттер".

Использование диодов с резистором 450 Ом в КМОП ИС, изготовленных по

технологии "кремний на сапфире", позволило повысить допустимую величину воздействующего ЭСР до 325 В (для импульса длительностью 0,1 мкс); схема защиты с диффузионным резистором – от 60 до 1140 В (однако в этой схеме накладываются существенные ограничения по допустимой длительности воздействующего импульса). При необходимости обеспечения защиты от импульсов малой длительности рекомендуется использовать другие схемы. Так, применение разрядника позволяет повысить допустимое значение потенциала до 1500 В при длительности импульса 10 нс. Разрядник представляет собой зазор шириной порядка 50 мкм между вводом входного сигнала и металлизацией общего контура, причем этот зазор не рекомендуется покрывать пассивным оксидом. Использование "ложного эмиттера" предполагает шунтирование им при пробое коллекторного перехода и предохранение "ис-

тинного эмиттера" от перегрузки. В этом случае допустимое для ИС напряжение ЭСР возрастает до 2 кВ.

### 7.5.1. Встроенная защита МДП ИС

Для субмикронных технологий с применением силицидов в качестве контактов при использовании технологии слабого подлегирования областей стока и истока особенно важно обеспечить равномерное распределение разрядного тока после пробоя, своевременное включение защитного элемента и быстрый отвод тока с наименьшим рассеиванием тепла. Схема защиты должна иметь минимальное паразитное сопротивление и емкость, чтобы минимизировать падение напряжения на этом элементе и уменьшить дополнительную нагрузочную емкость защищаемого устройства в случае ее использования в выходном буфере.

Для защиты МОП ИС от электрического пробоя обычно применяют прибор с р-п-переходом, который должен предотвращать превышение потенциала на затворе выше критического. Тип используемого прибора с р-п-переходом определяется технологией изготовления и областью применения ИС. Основные схемы защиты затворов КМОП-структур следующие:

- схема включения диодов защиты с большим напряжением пробоя;
- схема с использованием распределенных диодов в цепи питания;
- схема с зенеровскими диодами, отличающимися малой величиной пробойного напряжения;
- схема с использованием р-канальных транзисторов;
- схема с использованием двухсторонней комбинации р-канальных тран-



зисторов;

– схема с использованием искрового разрядника для защиты от больших напряжений.

В табл. 7.9 приведены семь способов защиты МОП БИС и необходимая для их реализации площадь кристалла.

Поиск схем защиты для МОП и КМОП ИС продолжается. Наряду с общераспространенными схемами имеется множество сообщений о создании новых схем защиты, конструкции и технологии их получения.

Например, наиболее существенной особенностью устройства для электростатической защиты МОП ИС является наличие двух ступеней защиты. Первая ступень выполнена на основе МОП-транзистора с толстым оксидом и рассчитана на высокие уровни напряжения. Вторая ступень стро-

ится на МОП-транзисторе с тонким оксидом и срабатывает при более низких уровнях. В состав устройства входят также диффузионные резисторы и диоды.



### **7.5.2. Схемы защиты МДП ИС, используемые в отечественной электронной промышленности**

Схемы, применяемые для внутренней защиты серийных отечественных МОП и КМОП ИС, представлены в табл. 7.10. Для защитных схем указан экспериментально полученный опасный потенциал ЭСР, поскольку в ТУ на ИС указывается допустимый потенциал, который не менее чем в 2 раза меньше опасного.

Схема № 1 выполнена с использованием диодов и наиболее часто применяется для защиты ИС. При ЭСР в зависимости от полярности открывается один из дио-

дов, и энергия разряда отводится на шину питания или земли. Часть энергии разряда рассеивается на резисторе. Данная схема обладает невысоким значением защитного потенциала, т.к. обладает эффектом неравномерного протекания тока разряда через диод в режиме пробоя, снижающим ее защитные свойства

Схема № 2 является упрощенным аналогом схемы, рассмотренной выше. При отрицательной полярности ЭСР эта схема работает аналогично, при положительной диод пропускает импульс тока разряда, работая в прямом режиме. Данная схема обладает теми же недостатками, что и предыдущая, и, кроме того, диод в прямом режиме имеет более высокое динамическое сопротивление, чем в режиме пробоя. Поэтому защитные свойства этой схемы различны при разных полярностях ЭСР, хуже при положительной.

В схеме № 3 используется МОП транзистор в диодном включении (два встречно-включенных диода). Обладает

теми же недостатками, что и схема № 1, и имеет, кроме того, более высокое динамическое сопротивление.

Защитные схемы № 4 – 9, применяемые в ИС, являются более сложными. В схемах № 4 – 5 для улучшения защитных свойств применены соответственно дополнительный МОП-транзистор и диод. Схема № 5 обладает небольшим сопротивлением, что позволяет использовать ее для защиты выхода ИС.



В схеме № 6 значительное увеличение площади защитной ячейки и применение распределенной структуры диодов позволило поднять величину опасного потенциала ЭСР до 5000 В.

Таким образом, в отечественной практике для защиты МДП ИС от ЭСР используются ряд схем защиты, обладающие невысокими защитными свойствами (не более 5000 В).

### **7.5.3. Встроенная защита биполярных ИС от воздействия ЭСР**

Как отмечалось, отказы из-за ЭСР создают проблему не только для МДП ИС, но и для биполярных ИС. Семь типов схем защиты линейных биполярных ИС, величины порогового напряжения и площадь

кристалла, необходимая для их реализации приведены в табл. 7.11.

Общая характеристика защитных структур заключается в том, что они фиксируют перегрузку напряжения, закорачивая его до напряжения заземления или питания так, чтобы ток на переходе база-эмиттер ограничивался. Там, где в процессе теста применялись положительный (для заземления) и отрицательный для питания разряды, защитная цепь дублировалась — одна половина на заземление, другая на питание.

Для защиты ИС ЗУ динамического типа от воздействия ЭСР предложено использовать дополнительные «охранные» устройства (табл. 7.11, схема 5). Вокруг всей, включая контактные площадки, ИС, выполненной в монокристаллической подложке р-типа, создается диффузионное кольцо n<sup>+</sup>-типа. Это кольцо соединяется с фиксированным потенциалами, выполняет функции "коллектора" всех неосновных

носителей заряда, генерируемых в подложке. Входная цепь защиты, кроме традиционных резистора и МДП-транзистора, содержит также паразитный биполярный транзистор с оборванной базой и два включенных в противоположных направлениях диода с общим анодом.





#### **7.5.4. Особенности встроенной защиты БиКМОП ИС**

БиКМОП технология объединяет в едином технологическом процессе как МОП-элементы, так и биполярные. Разработка этой технологии редко начинается «с пустого места». Обычно за основу берется какая-либо из существующих КМОП (реже биполярных) технологий и в нее добавляются технологические операции для формирования биполярных (МОП) элементов. Поэтому существует множество разновидностей БиКМОП технологий, от-

личающихся взятой за основу технологией и количеством добавляемых элементов. Если за основу принята технология КМОП, то чаще всего в ИС добавляются p-n-транзисторы и диоды, реже p-n-p-транзисторы и диоды Шоттки, еще реже дополнительные МОП-элементы (высоковольтные МОП-транзисторы, МНОП-транзисторы).

Поэтому для БиКМОП ИС могут применяться защитные ячейки, разработанные как для МОП, так и для биполярных ИС. При разработке встроенной защиты для таких микросхем необходимо учитывать, какая технология КМОП или биполярная взята за базовую. Если в выбранной защитной ячейке присутствуют элементы, которые в базовой технологии являются паразитными и в тоже время они имеются в БиКМОП процессе, то необходимо рассмотреть возможность их замены на эквивалентные, что улучшит их пара-

метры и, следовательно, эффективность защитной ячейки.

Конечно, введение в ИС дополнительных элементов, необходимых для создания защитной схемы, в принципе ухудшает некоторые технические характеристики, усложняет производство и может снижать надежность приборов. Поэтому, если бы можно было эффективно устранить опасность повреждения ИС с помощью внешних защитных мероприятий, их следовало бы предпочесть внутренней защите. И даже при наличии внутренней защиты внешняя все же оказывается необходимой.

### **Контрольные вопросы**

1. Какова природа возникновения электростатических зарядов при производстве ППИ?
2. Расскажите о моделях воздействия

ЭСР на ППИ?

3. Какие три категории дефектов ППИ возникают при воздействии ЭСР?

4. Каков порог чувствительности различных типов ППИ?

5. Как влияет ЭСР на ИС с диэлектрической и р-п-изоляцией?

6. Какова величина энергии, необходимой для повреждения ППИ?

7. Какова зависимость количества разрядных импульсов, приводящих к катастрофическим отказам БИС, от напряжения ЭСР?

8. Расскажите о коллективных и индивидуальных мерах защиты от ЭСР.

9. Нарисуйте основные схемы внутренней защиты затворов к МДП-структур от ЭСР.

10. Нарисуйте основные схемы внутренней защиты биполярных линейных ИС

от ЭСР.

## 8. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ИС

Полупроводниковые изделия наиболее чувствительны к радиации, и по ним приходится рассчитывать всю радиоэлектронную аппаратуру на радиационную стойкость. Наибольшее применение получили ИС, изготавливаемые из кремния, поэтому и развитие радиационно стойких ИС началось в первую очередь с кремниевых схем. Только ИС из арсенида галлия сравнимы или даже превосходят кремниевые ИС, но разработка и выпуск их в настоящее время значительно ниже, чем кремниевых ИС.

До недавнего времени для создания аппаратуры, в которой требовались радиационно стойкие ИС, использовались толь-

ко биполярные схемы или чрезвычайно дорогие схемы, изготавливаемые с помощью комбинированной технологии. Однако новые технологические методы, методы конструирования и материалы, применяемые в последних поколениях обычных МДП ИС для повышения их рабочих характеристик, увеличили радиационную стойкость этих изделий.

### 8.1. Источники радиации

Говоря о влиянии радиации на ИС, будем иметь в виду следующие виды излучений – радиацию ядерных взрывов и ядерных (силовых и энергетических) установок; космическое ионизирующее излучение. Временная диаграмма гамма-излучения при ядерном взрыве обычно содержит начальный пик длительностью в несколько наносекунд, который затем спадает в течение 20 – 30 нс. Благодаря своей

высокой энергии (более 1 МэВ) гамма-лучи обладают высокой проникающей способностью. Нейтроны движутся с несколько меньшей скоростью, чем гамма-лучи, поэтому импульс нейтронного излучения обычно следует через короткий промежуток времени после гамма-импульса. Примерно 75 % всей энергии, выделяющейся при ядерном взрыве, приходится на долю рентгеновского излучения. В земной атмосфере рентгеновские лучи очень сильно поглощаются и вызывают образование вокруг ядерного заряда ионизированной области. С увеличением высоты взрыва область распространения рентгеновских лучей в атмосфере из-за уменьшения плотности воздуха увеличивается. На достаточно больших высотах при взрыве ядерного заряда значительная доля энергии выделяется в виде сверхжесткого рентгеновского излучения – СЖРИ (на малых высотах значительная доля

энергии СЖРИ ядерного взрыва поглощается атмосферой). Для количественных оценок принято отождествлять реальный спектр СЖРИ ядерного взрыва с моноэнергетическим с энергией квантов 50 кэВ. Ядерный взрыв сопровождается также электромагнитным импульсным излучением (ЭМИ) сложной природы с широким спектром компонентов.

ЭМИ возникает в результате нескольких физических механизмов, но наиболее важным из них является гамма-излучение. Электроны комптоновского рассеивания с энергией около 1 МэВ порождают при движении в воздухе 30 тыс. вторичных электронно-ионных пар. Это создает электрическую проводимость атмосферы, которая становится важным фактором, влияющим на амплитуду и форму ЭМИ. Точные характеристики ЭМИ определяются точкой ядерного взрыва, его высотой над поверхностью земли. Интен-

сивность ЭМИ особенно сильна при взрывах в атмосфере, при этом чем выше высота взрыва, тем большая площадь поверхности земли подвергается воздействию ядерного ЭМИ. При атмосферном взрыве ЭМИ, которое распространяется в виде плотной волны, характеризуется следующими параметрами: интенсивность электрического поля 50 кВ/м, время воздействия до пика примерно 20 нс, время спада до половины пика около 450 нс.

В таблице 8.1 приведены реальные данные по радиационному воздействию в различных случаях.

Энергия электронов, воздействие которых учитывается при облучении искусственных спутников земли, составляет 0,3 – 5 МэВ, так как электроны с меньшей энергией поглощаются корпусом спутника и не достигают изделий электронной техники.

## 8.2. Радиационные повреждения в кремниевых ИС

Радиационные повреждения в биполярных и МДП ИС зависят от вида излучения и его временных характеристик: представляет оно собой короткий динамический мощный импульс или действует в течение длительного времени. В то время как 50 % энергии нейтронов передается решетке кремния, соответствующая доля гамма-лучей значительно меньше. Скорость образования дефектов для потоков фотонов с энергии 1 МэВ через поверхность в  $1 \text{ см}^2$  равна всего  $10^{-3} \text{ см}^{-1}$ . Следовательно, нарушения в кремнии незначительны вплоть до доз  $10^6$  рад ( $2 \cdot 10^{15}$  гамма-частиц/ $\text{см}^2$  с энергией 1 МэВ). В целом при потоке нейтронного облучения менее  $10^{10} \text{ см}^{-2}$  в кремниевых изделиях не происходит никаких изменений. При увеличении указанного потока в биполярных приборах

начинается уменьшение коэффициента усиления, тогда как МДП-приборы без вреда для себя в состоянии выдержать дозы облучения нейтронами на несколько порядков величин больше.

Из опубликованных материалов о радиационной стойкости ППИ известно, что до дозы мощностью  $10^4$  рад/с влияние мощности дозы несущественно.

Физические эффекты, происходящие при воздействии радиации на полупроводниковые изделия, делят на объемные, поверхностные и эффекты, связанные с возникновением ионизационных токов.

Объемные эффекты, связанные со структурными повреждениями кристаллической решетки, приводят к изменению электрических характеристик полупроводника - времени жизни неосновных носителей заряда, концентрации основных носителей заряда и подвижности. Поверхностные эффекты изменяют величину поверхностного потенциала и увеличивают скорость поверхностной рекомбинации. Появление ионизационных токов в полупроводнике связано с генерацией, излучением неравновесных электронно-дырочных пар.

К основным последствиям нейтронного облучения относится нарушение кристаллической решетки, приводящее в ко-

нечном итоге к образованию разупорядоченных областей, содержащих междоузлия, вакансии и сложные собственные дефекты. В результате уменьшается время жизни неосновных носителей и растет удельное сопротивление полупроводникового материала, что сопровождается уменьшением коэффициента передачи тока биполярного транзистора при низких коллекторных токах и увеличением тока утечки диодов с обратнo смещенными переходами при невысоких уровнях нейтронного облучения.

Ионизирующее излучение в виде высокоэнергетических электронов, гамма-фотонов и рентгеновских лучей взаимодействует с поверхностью, генерируя при этом электронно-дырочные пары, и, следовательно, локализованный в ловушках заряд. При низких уровнях накопленной



дозы ионизирующего излучения локализованный в оксиде заряд обуславливает сдвиг порогового напряжения, а при высокой – вторичный эффект, приводящий к образованию поверхностных состояний. Высокий уровень ионизирующего излучения, кроме того, усиливает рекомбинацию инжектированных неосновных носителей у поверхности раздела кремния пассивирующим покрытием, в результате чего снижается подвижность носителей в базе. Воздействие ионизирующего излучения выражается в возникновении фототока, величина которого зависит от мощности дозы и ширины его импульса.

Основными эффектами, которые вызывает фототок генерированных при облучении носителей, являются увеличение потенциала базы и паразитное "защелкивание", при котором некоторые типы ИС

почти закорачиваются, т.е. переходят в режим работы, сходный с активным режимом работы диодисторов. Падение напряжения на ИС становится малым, ток относительно большим, схема перестает функционировать и заблокирована до тех пор, пока не снято напряжение питания. Обычно типы отказов ИС при появлении дефекта "защелкивания" – это перегорание шины питания, короткие замыкания на ключе, короткие замыкания шины питания на выход, деградация защитных диодов и др.

Результаты экспериментов показывают, что эффекту "защелкивания" как одному из основных механизмов понижения надежности и потери работоспособности при воздействии ионизирующего излучения в наибольшей степени подвержены КМОП схемы, изготовленные по объемной технологии, в большинстве биполярных

ИС "защелкивание" маловероятно. Би-КМОП по этим характеристикам аналогична КМОП технологии, поскольку в таких схемах уровень отказов определяется n-канальным транзистором.

В космосе для ИС существуют другие источники опасности – заряженные частицы, которые являются потенциальными источниками однократных сбоев, т.е. изменений логического состояния цифровой схемы в результате прохождения через некоторую область одиночной частицы с высокой энергией, способной сформировать ложный электрический сигнал, вызвав изменение состояния схемы.

### **8.3. Влияние радиации на биполярные ИС**

Радиационная стойкость биполярных ИС зависит от схемотехники, конструкции и технологии их изготовления.

У большинства типов логических ИС

при облучении отмечены одинаковые изменения многих важных параметров. Такой результат есть следствие функциональной зависимости этих параметров от коэффициента усиления транзисторов ИС и преобладания деградации значения коэффициента усиления транзисторов над другими дефектами при облучении. Увеличение напряжения насыщения транзисторов ИС при облучении также является причиной изменений параметров ИС. Качественно деградация ИС при облучении быстрыми нейтронами сопоставима с деградацией вследствие электронной бомбардировки. При этом экспериментально подтверждено, что доля поверхностных дефектов является доминирующей до потоков нейтронов порядка  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

Эффект импульсной радиации в ИС с изоляцией р-n-переходом есть генерация фотоэлектрического или первичного фототока в многочисленных р-n-

переходах. Так как значение первичного фототока пропорционально площади перехода, то основные источники этого тока находятся в большого размера переходах изоляции между компонентами схемы и подложкой.

На рис. 8.1, 8.2 показана зависимость выходного напряжения открытой  $U_{OL}$  и закрытой  $U_{OH}$  схем и входного тока закрытой схемы  $I_{IH}$  от потока быстрых нейтронов для схем ДТЛ с окисной изоляцией карманов.

Стойкость восьмибитного арифметического логического устройства (АЛУ), спроектированного фирмой Raytheon и имеющего 1144 ключа интегральной логики Шоттки, 56 внутренних буферов и 36 программируемых входных (выходных) буферов, к нейтронному облучению – до  $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Стойкость к нейтронному облучению сумматоров и универсально-

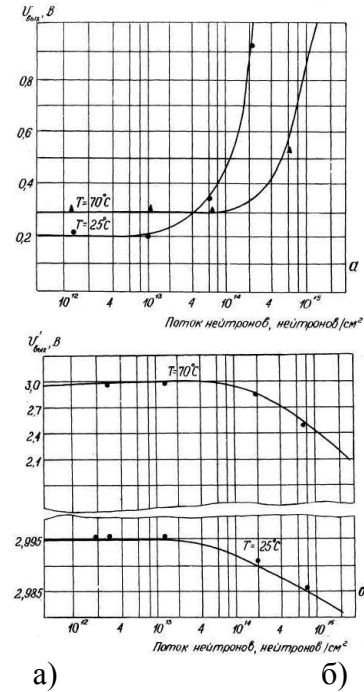


Рис 8.1 Зависимость выходного напряжения открытой (а) и закрытой (б) схем ДТЛ при воздействии быстрых нейтронов

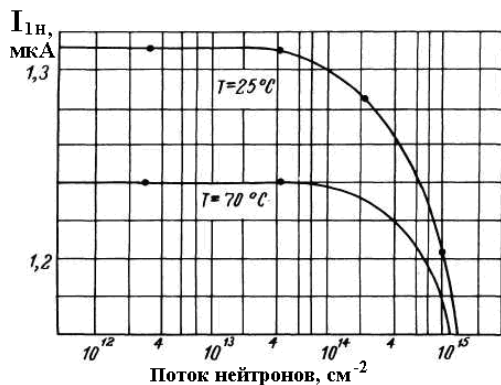


Рис 8.2 Зависимость входного тока закрытой схемы ДТЛ при воздействии быстрых нейтронов

го регистра сдвига –  $1,3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, при этом воздействии началось существенное изменение задержки работы схемы. Обе схемы работали нормально также при мощностях дозы гамма-излучения  $10^8$  рад/с. При эксперименте наблюдалось, что стойкость к

радиации каждого из испытанных образцов одного типа ИС может различаться в 3 раза.

Если оценивать стойкость ИС по их типам и величине интегрального потока быстрых нейтронов  $\Phi_n$ , общей поглощенной дозе гамма-излучения  $D_\gamma$  и мощности дозы импульсного гамма-излучения  $P_\gamma$ , то можно отметить, что наиболее высокой радиационной стойкостью из биполярных схем обладают схемы типа ЭСЛ, так как используют высокочастотные транзисторы, работающие в линейном (ненасыщающем) режиме при больших рабочих токах. Наиболее перспективными с точки зрения повышения стойкости схем типа ТТЛ являются схемы типа ТТЛШ.

Аналоговые ИС на биполярных транзисторах более чувствительны к гамма-излучению, чем логические. В первых процент полного отказа составил 1,4, а случайные отказы – 0,9. Аналогичные данные для логических ИС составили со-

ответственно 0,6 и 0,1 %.

Аналоговые схемы по всем трем показателям ( $\Phi_n$ ,  $D_\gamma$ ,  $R_\gamma$ ), в общем, более чувствительны к воздействию ионизирующего излучения, чем логические ИС, что обусловлено прежде всего более высоким напряжением питания ( $\pm 15$  В против + 5 В).

#### **8.4. Влияние радиации на МДП-схемы**

МДП-приборы работают на основных носителях (в отличие от биполярных, работающих на неосновных носителях), поэтому они мало восприимчивы к нейтронному излучению до потока  $10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Суммарная доза ионизирующего излучения больше сказывается на МДП ИС, чем на биполярных. Она приводит к постоянным изменениям такого критического параметра, как пороговое напряжение  $U_0$ , т.е. минимальное напряжение, прилагаемое к

затвору МДП-приборов для того, чтобы канал между его истоком и стоком начал проводить. Поэтому фактором, сдерживающим широкое применение МДП-приборов, в частности КМОП ИС, в аппаратуре, эксплуатируемой в условиях воздействия ионизирующего излучения, является их относительно невысокая радиационная стойкость, которая в большинстве случаев характеризуется дозой гамма-излучения порядка  $10^4$  рад.

Доза излучения, полученная МДП ИС, может вызывать необратимые изменения электрических характеристик приборов. Это происходит главным образом из-за образования поверхностных состояний на границе кремний-диэлектрик и накопления положительных зарядов в затворном оксидном диэлектрике, захватываемых ловушками. Захваченный ловушками положительный заряд в подзатворном оксиде сдвигает пороговые напряжения как n-, так

и р-канальных транзисторов в отрицательном напряжении, приводя в конечном счете к отказу схемы.

Другими словами, в процессе облучения МДП-приборов дырки, созданные при ионизации затворного диэлектрика, захватываются ловушками и формируют положительные объемные заряды в оксиде поверхностных состояниях, локализованных на границе раздела Si – SiO<sub>2</sub>. Поверхностные состояния амфотерны: центры с энергетическими уровнями в верхней половине запрещенной зоны кремния играют роль акцепторов (в заполненном состоянии они отрицательно заряжены), а в нижней половине – доноров (пустые центры заряжены положительно).

Образование поверхностных состояний на границе оксид – кремний ведет к снижению крутизны характеристик МДП транзисторов и дополнительному увеличению радиационного сдвига их пороговых

напряжений. Снижается также эффективная подвижность носителей, изменяется коэффициент усиления транзисторов. Плотность поверхностных состояний резко увеличивается при повышении уровня накопленной дозы выше 10<sup>4</sup> рад.

Основными видами отказов КМОП инверторов при воздействии ионизирующего излучения (ИИ) являются:

- отсутствие переключательных свойств, когда значение выходного напряжения остается постоянным во всем диапазоне изменения входного напряжения в связи с тем, что n-канальный транзистор открыт уже при  $U_{Вх} = 0$  и порог переключения меньше нуля;

- уменьшение быстродействия в связи с увеличением времени задержки распространения сигнала, что обусловлено сдвигом порогового напряжения n-канального транзистора к более положительным значениям, а р-канального – к бо-

лее отрицательным значениям, что приводит к увеличению эффективного сопротивления канала при определенном входном напряжении и увеличению времени, необходимого для зарядки и разрядки емкости на выходе схемы;

– увеличение токов утечки (следовательно, и потребляемой мощности в статическом режиме), когда пороговое напряжение n-канальных транзисторов становится отрицательным;

– снижение помехоустойчивости схем с высоким уровнем выходного сигнала, связанное с уменьшением порога переключения схемы и тем самым амплитуды положительного напряжения помехи, не вызывающей переключения схемы, а для схем, работающих при низком уровне выходного сигнала, наоборот, возрастание помехоустойчивости (к воздействию отрицательной помехи) при облучении.

Все виды отказов, кроме второго,

обычно наблюдаются при малых дозах облучения, особенно в том случае, когда n-канальный транзистор находится в открытом состоянии при облучении (на входе высокий уровень напряжения).

Рассмотрим для примера поведение при облучении КМОП-схем типа 54НС00 (четыре двухвходовых логических элемента И-НЕ-схема малой степени интеграции) фирм Motorola и National Semiconductor.

Наиболее чувствительным к воздействию ИИ оказался статический ток потребления. Динамический ток потребления характеризует работоспособность ИС в рабочем режиме. Отмечено незначительное его увеличение по сравнению со статическим током потребления на частоте 1 МГц после дозы 60 крад. Функциональные отказы схем наблюдались при более высоких дозах ионизирующего излучения, чем отказы по току потребления.

Входное напряжение низкого и вы-

сокого уровня (порог переключения) у обеих схем уменьшается при увеличении дозы излучения, причем для простой схемы И-НЕ в большей степени в случае высокого уровня входного сигнала, что объясняется большим дрейфом порогового напряжения n-канальных МОП-транзисторов, у которых на затворе положительное напряжение. Отказы по данным параметрам наблюдались после доз 40 крад.

Испытания микропроцессоров на n-МОП-транзисторах типа 8086 показали, что их радиационная стойкость равна  $(0,9-1,6) \cdot 10^4$  рад. В результате анализа выходных данных установлено, что 70 % отказов таких микропроцессоров после облучения обусловлены нарушениями в работе счетчика команд или блока прерывания. Примерно 20 % нарушений функционально связаны с отказами в выполнении команд, а причины 10 % отказов не установлены.

МДП ИС на монолитных подложках, в которых р-n-переходы занимают относительно большой объем, чувствительны к импульсному ионизирующему излучению, тогда как КМДП ИС на изолирующих подложках, в которых этот относительный объем намного меньше, сравнительно менее восприимчивы к такому излучению.

Испытание КМОП/КНС элементов памяти при разных значениях мощности дозы гамма-излучения показало, что имеется четко выраженная зависимость радиационной стойкости от мощности дозы облучения. Например, вероятность отказа 10% схем при облучении мощностью  $1,5 \cdot 10^2$  рад/с имеет место при накапливаемой дозе  $10^3$  рад, а при мощности  $1,6 \cdot 10^{-3}$  рад/с эта же вероятность отказа будет иметь место при накапливаемой дозе  $4,3 \cdot 10^3$  рад, т.е. при уменьшении мощности дозы стойкость увеличивается.



Установлено, что КМОП-приборы схем переходят в режим "зашелкивания" при воздействии импульса гамма-излучения длительностью 30 нс с мощностью дозы  $10^{11}$  рад/с. Сбои КМОП логических схем наблюдаются при мощности дозы  $2 \cdot 10^{10}$  рад/с. Сбои регистра сдвига наблюдаются при мощностях дозы  $10^9$  рад/с и выше.

### **8.5. Воздействие рентгеновского излучения на ИС**

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом зависит от энергии кванта и атомного номера элементов, входящих в состав материала изделия.

Кремний сравнительно стоек к рентгеновскому излучению, однако фотоны с повышенной энергией оказывают на него воздействие, изменяя электрические характеристики всех полупроводниковых

изделий. Проводимость р-типа увеличивается, и в изделиях с изоляцией р-n-переходов происходит короткое замыкание. Кроме того, в системе одновременно включаются все транзисторы, что приводит к возникновению большого импульса тока и выходу из строя схем и источников тока.

Существовало мнение, что рентгеновские лучи с повышенной энергией (50 кэВ), так называемые СЖРИ, менее опасны, так как они почти полностью проходят через золотые проводники в случае их применения в ИС. При меньшем уровне энергии лучи также проходят через слой золота, но значительная часть их энергии поглощается материалом (фотоэлектрическое поглощение), что может привести к испарению золотой металлизации и выходу из строя ИС. При этом степень разрушений зависит от энергии квантов падающего излучения, физических свойств ис-

пользуемого материала и возрастает с увеличением поглощенной дозы.

Сказанное выше справедливо, если рассматривать процесс взаимодействия рентгеновского излучения с веществом только как фотоэлектрическое поглощение. Но для СЖРИ характерен процесс взаимодействия с веществом типа комптоновского рассеяния, который приводит к передаче энергии фотонам решетки вещества. Процесс продолжается до тех пор, пока практически вся поглощенная энергия фотонов (примерно 98 %) передается решетке. Уровни воздействующих потоков СЖРИ на ИС могут составлять от единиц до нескольких десятков кал/см<sup>2</sup>. Так как воздействию потока СЖРИ 1 кал/см<sup>2</sup> соответствует поглощенная доза по кремнию около  $0,875 \cdot 10^5$  рад, то при реальных условиях воздействия СЖРИ полупроводниковые изделия получают дозу, которая приводит к резкой деградации параметров и

потере работоспособности ИС на их основе.

В результате поглощения энергии СЖРИ происходит также разогрев ИС и возникают следующие дефекты: разрушение конструкции изделий в результате расплавления прокладок, выполненных из тяжелых материалов (золото, свинец, олово и др.), обрыв внутренних выводов от позолоченных траверс, а также разрушение целостности кристалла из-за термомеханических напряжений, обусловленных неравномерным разогревом.

Кроме того, при воздействии СЖРИ при уровнях облучения свыше 1 кал/см<sup>2</sup> в РЭА генерируются электрические потенциалы значительной величины и через элементы электронных схем протекают импульсные токи большой амплитуды, что может вызвать отказы ИС в виде снижения допустимых напряжений, увеличения обратных токов, разрушения внутренних вы-

водов и металлизированных структур, пробоа р-п-переходов и т.д. Существующие сейчас полупроводниковые изделия обычного исполнения имеют стойкость к воздействию СЖРИ порядка 0,5 – 5 кал/см<sup>2</sup>.

### **8.6. Влияние конструктивно-технологических факторов на радиационную стойкость ИС**

Создание радиационно стойких ИС является комплексной задачей, решаемой схемотехническими и конструктивно-технологическими путями. Некоторое повышение радиационной стойкости ИС можно достигнуть за счет подбора соответствующего электрического режима работы ИС в аппаратуре и за счет отбора ИС с минимально-максимальными значениями параметров. Использование специальных схемных решений (дополнительных ком-

плектующих элементов и цепей) позволяет достаточно эффективно улучшить показатели радиационной стойкости ИС. Повысить стойкость ИС к ионизирующему излучению можно за счет применения различных схем компенсации и использования обратных связей.

*Биполярные ИС.* Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости биполярных ИС включают: обеспечение радиационной защиты и стойкости активных и пассивных элементов ИС, создание надежной электрической изоляции элементов в условиях радиации.

Например, при построении радиационно стойкого логического элемента 4-входного вентиля И-НЕ, который совместно с ИС ТТЛ служит для построения более сложных схем, защита от выжигания при гамма-импульсе обеспечивается резистором, а дополнительные диоды обеспе-

чивают компенсацию фототока в вентиле. Для создания оптимальной компенсации диоды сформированы на переходах коллектор – база с теми же площадями и той же геометрией, что и выходные транзисторы. Полученный  $n^+$  глубокой диффузией 15-омный резистор защищает от выгорания схемы при гамма-излучении. Диод Шоттки обеспечивает защиту от превышения напряжения, которое может возникнуть при работе быстродействующих транзисторов ТТЛ в нескомпенсированных линиях. Защита от выжигания по цепи питания для сложных схем, построенных на вентилях И-НЕ с ТТЛ ИС, сделана на уровне вентиля или ячейки для устранения возможности появления петли обратной связи по цепи питания.

Радиационная стойкость интегральных диодов обеспечивается при использовании коллекторного или эмиттерных переходов радиационно стойкого транзисто-

ра.

Большие потенциальные возможности повышения радиационной стойкости активных элементов без ухудшения основных электрических параметров ИС имеет метод замены планарных р-п переходов торцевыми.

У ИС с изолирующими р-п-переходами значения фототоков почти на порядок выше, чем у ИС с изолирующими диэлектриками, чувствительность которых к радиации почти такая же, как чувствительность аналогичных схем на дискретных элементах. Поэтому радиационная стойкость ИС повышается по мере перехода от р-п-изоляции к сапфировым подложкам, при этом можно получать ИС, способные выдерживать мощность ионизирующего излучения до  $10^{11}$  рад/с. При исследовании воздействия реакторного излучения на пленки  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  обнаружено, что при облучении исследуемых структур

потоками быстрых нейтронов до дозы  $10^{14}$  см<sup>-2</sup> изменений основных электрофизических параметров этих пленок практически не происходит. При увеличении потока нейтронов до  $3,9 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> изменяется в основном только проводимость, причем в пленках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> это изменение проявляется в меньшей степени, чем в пленках SiO<sub>2</sub>. Поэтому при разработке радиационно стойких ИС целесообразно применять пленки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Использование только алюминиевой металлизации и алюминиевых выводов позволяет получить ИС со значительно более высокой вероятностью безотказной работы при воздействии радиации.

В настоящее время не существует единой точки зрения на выбор методов повышения радиационной стойкости БИС. Тем не менее можно сформулировать наиболее общие требования, предъявляемые к разработкам радиационно стойких БИС:

- уменьшение отношения числа ак-

- тивных элементов ИС к числу пассивных;
- снижение рассеиваемой в ИС мощности, т.е. уровней инжекции в активных элементах;

- повышение универсальности ИС, расширение их функциональных возможностей;

- ослабление зависимости выходных параметров ИС от значений коэффициентов усиления входящих в ее состав транзисторов.

Увеличение степени интеграции ИС достигается путем уменьшения геометрических размеров их элементов, в результате чего существенно возрастает влияние приповерхностных и пассивных областей кристалла на характеристики активных элементов и повышается чувствительность их параметров к качеству технологического процесса.

Обеспечение стойкости ИС путем уменьшения активных объемов элементов

имеет предел, так как с повышением среднестатистической стойкости отдельных элементов увеличивается и возможность появления катастрофических отказов. Величина критического активного объема находится в диапазоне  $10^{-14} - 10^{-12} \text{ см}^3$ .

Оптимизация конструкции сама по себе не является достаточной мерой для обеспечения радиационной стойкости ИС. Необходимо соответствующим образом модифицировать и оптимизировать технологию изготовления ИС.

Экспериментальные исследования чувствительности к ионизирующему излучению ИС, изготовленных по пяти различным технологиям (табл. 8.2) на одном типе схем ДТЛ, показали, что стойкость увеличивается в схемах от I к V классу, так как значение фототока и число источников фототока уменьшаются в том же порядке.

Таблица 8.2

Классы технологии и методы изоляции

Класс технологии	Метод изоляции компонентов	Проведение дополнительной диффузии	Способ изготовления резисторов
I	переходом	не проводилась	диффузия
II	переходом	проводилась золотом	диффузия
III	диэлектриком	не проводилась	диффузия
IV	диэлектриком	проводилась золотом	диффузия
V	диэлектриком	проводилась золотом	тонкопленочные

Диффузия золота в полупроводниковый материал оказывает большое влияние на чувствительность схем с изоляцией р-п-переходом и небольшое на характеристики схем с изоляцией диэлектриком.

Для повышения радиационной стойкости ИС необходимо получать транзисто-

ры со ступенчатым профилем легирования в эмиттере, сформированным неглубокой диффузией мышьяка, вместо плавного перехода, образуемого диффузией фосфора. Это объясняется тем, что эффективная скорость рекомбинации в эмиттере оказывается ниже при легировании мышьяком и выше при использовании фосфора.

Перспективным методом создания радиационно стойких ИС является ионная имплантация. Полностью ионно-легированные активные структуры и ИС отличаются малыми размерами при сохранении, а иногда и при улучшении основных электрических и эксплуатационных характеристик.

*МДП-схемы.* Основываясь на результатах исследования КМДП ИС, специалисты фирмы RCA предложили следующие схемотехнические решения для повышения их радиационной стойкости:

1. Использование автоматического

устройства, которое позволяет по мере увеличения дозы облучения повышать напряжение питания каждой комплементарной пары до значения, обеспечивающего переключение состояний при данной дозе.

2. Применение резервирующих систем с таким расчетом, чтобы одна из систем автоматически заменяла другую после набора ею критической дозы. Система, не находящаяся в рабочем режиме, будет в значительной степени восстанавливаться, поскольку она облучается при нулевом потенциале на электродах.

3. Восстановление параметров МДП ИС до их первоначальных значений посредством увеличения тока стока до величины, обеспечивающей повышение температуры каждого кристалла до 150 – 200 °С на период времени, достаточный для температурного отжига. Однако применение этого метода осуществимо при наличии источника питания достаточно большой

мощности.

4. Введение токоограничивающих элементов в схемы. Реализация их решений повышает радиационную стойкость МДП ИС, в том числе и к "эффекту защелкивания".

Исследования влияния длины канала МДП-транзисторов на изменение их порогового напряжения в процессе облучения показывают, что чувствительность этого параметра к воздействию гамма-излучения возрастает по мере уменьшения длины канала.

Если сравнить электрическую проводимость используемых диэлектриков, то она оказывается возрастающей в таком порядке:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , и структуры с диэлектриком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  оказываются более стойкими к облучению.

С уменьшением толщины подзатворного диэлектрика радиационная стойкость ИС возрастает с 3000 рад при толщине бо-

лее 0,1 мкм до 10200 рад при толщине 0,07 мкм.

МОП-структуры с затвором из хрома обеспечивают наиболее высокую стабильность заряда по сравнению с молибденом и алюминием. Небольшие добавки фосфора в оксид в конце роста из источника  $\text{P}_2\text{O}_5$  перед нанесением хромового затвора позволяют улучшить радиационные свойства МОП-структур.

Схемы конструкции МНОП более устойчивы к накопленной дозе радиации, чем схемы МОП-конструкции.

В КМДП ИС подзатворный диэлектрик должен иметь малую плотность объемного заряда, низкую плотность поверхностных состояний, малое количество сквозных проколов и высокое пробивное напряжение.

Наилучшая радиационная стойкость р-канальных МДП-изделий достигалась при следующей последовательности опе-



раций:

– исходный кремний ориентации (100);

– толщина затворного оксида минимальная; например, толщина оксида была уменьшена с 100 до 72,5 нм; .

– выращивание затворного оксида в сухом кислороде при температуре 1000 °С;

– отжиг после окисления в азоте либо не проводится, либо проводится при температуре не выше 800 °С;

– алюминий наносится вакуумно-термическим методом и вжигается при температуре 500 °С.

Данная технология может быть применена в КМОП ИС и n-канальных приборах, если применять компенсацию дырочных ловушек в подзатворном оксиде посредством, например, ионной имплантации.

Таким образом, выбором надлежащей конструкции и технологии изготовле-

ния ИС можно существенно увеличить радиационную стойкость изделия.

### **Контрольные вопросы**

1. Охарактеризуйте источники радиационного излучения.

2. Можно ли проводить испытания ППИ отдельно гамма-излучением и нейтронами и почему?

3. Что относится к космическому излучению?

4. Какое влияние оказывает ионизирующее излучение на кремниевые биполярные ИС?

5. Начертите зависимости основных параметров логических схем ДТЛ при воздействии быстрых нейтронов.

6. Сравните по чувствительности к радиации биполярных логических и анало-

говых схем.

7. Какое влияние оказывает радиация на МДП-схемы?

8. Как влияет мощность дозы излучения на стойкость МДП-схем?

9. Расскажите о влиянии рентгеновского излучения на ИС.

10. Как влияет конструктивно-технологические факторы на стойкость биполярных ИС?

11. Назовите наиболее общие требования к методам повышения радиационной стойкости БИС.

12. Расскажите о чувствительности к ионизирующему излучению ИС, изготовленных по различной технологии.

13. Какие схемотехнические и конструктивные решения Вы знаете для повышения радиационной стойкости МДП-схем?

14. При какой последовательности операций получается наилучшая радиационная стойкость р-канальных МДП-схем?



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Данное учебное пособие содержит сведения об основных понятиях в теории качества и надежности полупроводниковых изделий, о современных требованиях к конструкции ИС, о методах защиты ИС от воздействия электростатических зарядов и о конструктивно-технологических методах повышения радиационной стойкости ИС.

Последовательное изложение учебного материала базируется на знаниях, полученных при изучении курсов «Процессы микро- и нанотехнологии», «Физика», «Математика».

Целостное изложение курса с приложением материалов по практическим занятиям позволит студентам применять методы статистической и графической обработки данных испытаний на долговеч-

ность, проводить расчет надежности ИС на этапе конструирования и проводить расчет теплового сопротивления и тепловой деформации внутренних соединений.

Данное учебное пособие существенно восполняет имеющиеся проблемы в учебной литературе по повышению надежности ИС как на этапе разработки, так и на этапе серийного производства.

Учебное пособие облегчит понимание и восприятие материала лекций по дисциплине «Конструкционные методы повышения надежности интегральных микросхем», читаемых студентам специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника» очной и заочной форм обучения, а также лекций по дисциплине «Технологические и конструкционные методы повышения надежности ИС», читаемых студентам-магистрантам направления 140400 «Техническая физика».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

### Введение

1. Основные понятия в теории качества и надежности
  - 1.1. Термины и определения
  - 1.2. Критерии и количественные показатели надежности
  - 1.3. Зависимости между основными характеристиками надежности
  - 1.4. Примеры решения задач по надежности
2. Требования к конструкции интегральных схем
  - 2.1. Технические требования к конструкции ИС
  - 2.2. Квалификационные испытания как средств подтверждения соответствия конструкции ИС требованиям ТУ
  - 2.3. Методы проверки конструктивно-технологических запасов ИС
  - 2.4. Методы испытаний

### Контрольные вопросы

3. Влияние выбора конструкции на надежность ИС
  - 3.1. Ограничения и допуски на компоненты ИС
  - 3.2. Ограничения при выборе размеров кристалла
  - 3.3. Конструктивно-технологическое исполнение ИС по методу изоляции элементов
  - 3.4. Оптимизация межсоединений
4. Конструктивное обеспечение надежности корпусов ИС
  - 4.1. Требования к конструкции корпусов
  - 4.2. Классификация корпусов по технологии изготовления и используемым материалам
  - 4.3. Металлокерамические корпуса
  - 4.4. Металлостеклянные корпуса
  - 4.5. Пластмассовые корпуса
  - 4.6. Корпуса чашечного типа
  - 4.7. Перспективные корпуса
5. Обеспечение надежности монтажа

### Контрольные вопросы

- кристаллов в корпуса
- 5.1. Наклейка кристаллов
- 5.2. Напайка кристаллов
- 5.3. Влияние внутренних напряжений в системе кристалл-корпус на надежность конструкции
- Контрольные вопросы
- 6. Обеспечение надежности внутренних соединений кристалла с выводами корпуса
- 6.1. Методы микросварки и оценка качества сварных соединений
- 6.2. Причины, влияющие на свариваемость микросоединений
- 6.3. Влияние легирования пленок алюминия на качество соединений при ультразвуковой микросварке
- Контрольные вопросы
- 7. Методы защиты ИС от электростатических разрядов
- 7.1. Природа возникновения электростатических зарядов при производстве полупроводниковых изделий
- 7.2. Результаты воздействия электростатических разрядов на полупроводниковые изделия
- 7.3. Коллективные и индивидуальные меры защиты от воздействия статических зарядов
- 7.4. Конструктивно-технологические методы повышения стойкости ИС к воздействию ЭСР
- 7.5. Методы встроенной защиты ИС от воздействия ЭСР
- 9 7.5.1. Встроенная защита МДП ИС
- 9 7.5.2. Схемы защиты МДП ИС, используемые в отечественной
- 9 электронной промышленности
- 9 7.5.3 Встроенная защита биполярных ИС от воздействия ЭСР
- 9 7.5.4 Особенности встроенной защиты

	БикМОП ИС			
	Контрольные вопросы	138		1.2.1. Размеры кристаллов
8.	Конструктивно-технологические методы повышения радиационной стойкости ИС	139		1.2.2. Размеры контактных площадок
8.1.	Источники радиации	139		1.2.3. Монтажная площадка корпуса
8.2.	Радиационные повреждения в кремниевых ИС	141		1.2.4. Состояние поверхности контактных площадок кристалла и корпуса
8.3.	Влияние радиации на биполярные ИС	145		
8.4.	Влияние радиации на МДП-схемы	Приложение 2.		Расчет тепловой деформации внутренних проводников ИС
8.5.	Воздействие рентгеновского излучения на ИС			
8.6.	Влияние конструктивно-технологических факторов на радиационную стойкость ИС	Приложение 3.		Расчет тепловых параметров ИС
	Контрольные вопросы	159		3.1. Общие положения
	Заключение	160		3.2. Методы определения тепловых параметров ИС
Приложение 1.	Правила проектирования для обеспечения надежности ИС	Приложение		4. Статистические и графические методы исследования качества и надежности ИС
	1.1. Общие положения	161		4.1. Понятие случайного события, случайные величины
	1.2. Технические требования	162		

4.2. Числовые характеристики случайных величин	187	уровня интеграции (менее чем 100 вентилей)
4.3. Графическая обработка совокупности случайных величин	193	5.2.3. Монолитные биполярные и МОП-аналоговые ИС
4.4. Статистическая и графическая обработка параметров ИС при длительных испытаниях или при изменении внешних условий	201	5.2.4. Монолитные биполярные и МОП-цифровые ИС высокого уровня интеграции (содержащие 100 и более вентилей)
Приложение 5. Расчет надежности ИС	210	5.2.5. Монолитные с МОП-структурой и биполярные запоминающие устройства
5.1. Расчет надежности по интенсивностям отказов на одну структурную единицу ИС	212	5.2.6. Примеры расчета интенсивности отказов ИС
5.2. Расчет надежности по методу оценки сложности ИС и влияния воздействующих факторов	215	5.3. Методы расчетно-экспериментального прогнозирования надежности на этапе разработки
5.2.1. Общий подход	215	
5.2.2. Монолитные биполярные и МОП-цифровые ИС малого и среднего		



(по РД 11.0755-90)	
5.3.1. Расчетный метод прогнозирования интенсивности отказов ИС	234
5.3.2. Примеры расчета интенсивности отказов ИС	245
5.4. Указания по использованию номограммы (рис. П.5.6) для расчета коэффициента ускорения, продолжительности и температуры испытаний	256
Библиографический список	257

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### ПРАВИЛА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИС

Роль работ по надежности за последние годы изменилась от оценки надежности изготовленного изделия к проведению работ, существенно влияющих на конструкцию изделия.

В отечественной практике конструктор при проектировании изделий должен руководствоваться как отраслевыми стандартами, так и стандартами предприятий. Например, в НПО «Электроника» действует стандарт предприятия (СТП) «Микросхемы интегральные. Кристаллы, контактные площадки корпуса. Монтажные площадки. Основные размеры», – который

применяется при проектировании топологии кристаллов для ИС, вновь разрабатываемых и модернизируемых со всеми видами приемки, а также при проектировании корпусов. Основные положения этого СТП изложены ниже.

#### **1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

1. Размер контактных площадок кристалла выбирается в зависимости от способов сварки (ручная или автоматическая), метода сварки (термокомпрессионная или ультразвуковая), диаметра применяемой проволоки.

2. Размер монтажной площадки корпуса выбирается в зависимости от размеров кристалла, размеров применяемого инструмента, точности позиционирования корпуса в рабочей зоне.

## **1.2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ**

### **1.2.1. Размеры кристаллов**

1. Кристаллы ИС в плане должны иметь квадратную или прямоугольную форму. Соотношение размеров сторон у кристалла прямоугольной формы не должно быть более 1 : 2.

2. Сторона кристалла должна быть меньше соответствующей стороны монтажной площадки корпуса не менее чем на 2 мм. При круглой монтажной площадке диагональ кристалла должна быть меньше диаметра площадки не менее, чем на 2 мм.

3. Расстояние между соответствующей стороной контактной площадки или любым другим активным элементом схемы и серединой скрайберной дорожки должно быть не менее 100 мкм.

4. Ширина скрайберных дорожек между модулями или условными линиями реза должна быть не менее 100 мкм для любого метода разделения пластин на кристаллы.

5. Разделительные (межсхемные) дорожки полупроводниковых пластин должны быть свободными по всей длине от металлических покрытий для лазерного и алмазного скрайбирования.

6. Для пластин, поступающих на операцию "дисковое разделение", допускается наличие металлизации по центру разделительных дорожек шириной не более 30 мкм.

7. Для вновь разрабатываемых изделий размеры кристаллов должны быть кратными 0,1 мм.

### **1.2.2. Размеры контактных площадок**

1. Зона монтажа определяется геометрическими размерами сварного соединения и общей точностью позиционирования установки при автоматической сварке. Оптимальные размеры зоны: ширина – 200 мкм, длина – 210 мкм.

2. Расстояние от края контактной площадки до ближайшей металлизированной шины или любого другого активного элемента схемы в направлении соответствующей контактной площадки корпуса должно быть не менее 40 мкм, во всех других направлениях – не менее 30 мкм.

3. Контактная площадка должна располагаться на изолированном кармане для технологии КСДИ. Расстояние от края контактной площадки до края изоляции должно быть не менее 10 мкм.

4. Геометрические размеры сварного соединения при УЗС внахлест должны быть не более: ширина – 2,5 диаметра проволоки, длина – 4,0 диаметра проволоки;

при термокомпрессионной сварке встык (шариком) – 4,5 диаметра проволоки.

5. Размеры контактных площадок под одну сварку в зависимости от диаметра привариваемой проволоки приведены в табл. П.1.1.

Таблица П.1.1

Диаметр привариваемой проволоки, мкм	Размеры контактных площадок, мкм
ПРИ СВАРКЕ ВНАХЛЕСТ	
30	120 × 130
35	130 × 140
ПРИ СВАРКЕ ВСТЫК	
25	120 × 120
30	140 × 140

6. Контактные площадки кристалла должны быть пронумерованы согласно КД на изделие, либо конфигурация первой

контактной площадки должна существенно отличаться от других.

### **1.2.3. Монтажная площадка корпуса**

1. Сторона монтажной площадки корпуса должна быть больше соответствующей стороны кристалла не менее, чем на 2 мм. При круглой монтажной площадке диаметр ее должен быть больше диагонали кристалла не менее чем на 2 мм.

2. При посадке кристалла в корпус для удобства проволочной разварки уровень контактных площадок корпуса должен быть расположен выше планарной плоскости кристалла на 0-0,45 мм.

3. Допускается неплоскостность для монтажной площадки не более 20 мкм.

4. Оптимальная длина проволочной перемычки 1,5 мм. Соотношение между самой короткой и самой длинной перемычками не более 1 : 2.

5. Минимальный размер монтажных площадок корпуса (траверс), свободных от стеклокерамики, равен  $0,3 \times 0,4$  мм.

6. Отношение длины проволочных перемычек к высоте их дуг не более 2 : 1.

### **1.2.4. Состояние поверхности контактных площадок кристалла и корпуса**

1. Толщина диэлектрической пленки на контактных площадках после вскрытия допускается не более  $100 \text{ \AA}$  (0,01 мкм) для ультразвуковой сварки внахлест,  $50 \text{ \AA}$  (0,005 мкм) – для термокомпрессионной сварки встык.

Примечание. Толщина диэлектрической пленки в  $100 \text{ \AA}$  соответствует 10 В,  $50 \text{ \AA}$  – 6 В пробивного напряжения при замере методом "мягкого зонда".

2. Толщина оксидной пленки на не планарной (обратной) стороне кристалла должна быть не более  $100 \text{ \AA}$  (0,01 мкм).

3. Толщина золотого покрытия на контактных площадках корпуса и монтажной площадке должна быть не менее 3 мкм. Покрытие должно быть равномер-

ным и плотным. Темно-желтое покрытие не допускается.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВНУТРЕННИХ ПРОВОДНИКОВ ИС

При изменении температуры от комнатной, например  $t_c = 22 + 2$  °С до максимальной или минимальной температур корпуса ИС ( $t_{к \text{ макс.}}$ ,  $t_{к \text{ мин.}}$ ), заданных в технологических условиях на ИС, происходит увеличение стрелы прогиба, что вызывает опасность замыкания внутренних проводников на крышку корпуса. При охлаждении стрела прогиба уменьшается, возникает опасность замыкания внутренних проводников на край кристалла.

Форма внутренних проводников в зависимости от метода сварки приведена на рисунке П.2.1.

Расчет величины стрелы  $h$  проводят на этапе опытно-конструкторской разработки.

### РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ СТРЕЛЫ ПРОГИБА ВЫВОДА

1. Величину стрелы прогиба следует находить по формулам (обозначения соответствуют рис. П.2.1):  
– для метода УЗС

$$h = \sqrt{\frac{3}{16}(L^2 - l^2) - 0,5\delta};$$

- для метода УЗСН

$$h = \frac{1}{2}\sqrt{L^2 - l^2} - 0,5\delta;$$

- для метода ТКС

$$h = \frac{L-l}{1,14} - 0,5\delta.$$

2. Допустимое значение деформации стрелы прогиба следует находить:

– при нагреве  $\Delta h_+ \leq 0,5 - h$ , мм;

– при охлаждении  $\Delta h_- \leq h - 0,1$ , мм.

3. При изменении температуры корпуса ИС на  $\Delta t_+ = t_{к \text{ макс}} - 22$  или  $\Delta t_- = t_{к}$



$t_{\text{мин}} - 22$  происходит изменение температуры внутренних проводников  $\Delta t_{L+} = t_{\text{к макс}} + 30 - 22$  или  $\Delta t_{L-} = t_{\text{к мин}} - 22$ , где  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  – максимальное превышение температуры кристалла и внутренних выводов над температурой корпуса.

4. Величину изменения стрелы прогиба следует находить по следующим формулам:

– для метода УЗС

$$\Delta h = \frac{3\Delta t_L}{16h} (L^2 \alpha_L - \frac{\Delta t_l}{\Delta t_L} l^2 \alpha_l),$$

где  $\Delta t_L = \Delta t_{L+}$  или  $\Delta t_{L-}$ ;  $\Delta t_L = \Delta t_{L+}$  или  $\Delta t_{L-}$ ;  $\alpha_L, \alpha_l$  – термические коэффициенты линейного расширения материалов соответственно внутренних проводников и основания корпуса, приведенные в табл. П.2.1;

– для метода УЗСН

$$\Delta h = \frac{\Delta t_L}{4h} \left( L^2 \alpha_L - \frac{\Delta t_l}{\Delta t_L} l^2 \alpha_l \right),$$

где  $h = 0,5\sqrt{L^2 - l^2}$  ;

Таблица П.2.1

Термические коэффициенты линейного расширения материалов

Материал	$\alpha, 10^{-6}$ град <sup>-1</sup>	Материал	$\alpha, 10^{-6}$
Алюминий	23,8	Медь	16,5
Бронза	17,5	Никель	13,0
Железо	12,2	Олово,	26,7
Золото	14,2	Свинец	29,0
Стекло	4,9	Серебро	19,5
Латунь	18,4	Сталь	11,7

Ковар	5,4	Керамика	6
-------	-----	----------	---

– для метода ТКС

$$\Delta h = \frac{\Delta t_L}{1,14h} (L\alpha_L - \frac{\Delta t_l}{\Delta t_L} l\alpha_l),$$

где  $h = \frac{L-l}{1,14}$ .

5. Критерий забракования. Для типового значения  $h = 0,3$  мм величина  $\Delta h_{\pm} \leq 0,2$  мм.

6. Значения параметров внутренних выводов, обеспечивающие условие  $\Delta h < \Delta h_{\pm}$ , вносят в конструкторскую документацию со следующей формулировкой:

«При указанных значениях параметров внутренних проводников гарантируется отсутствие их замыкания на корпус или край кристалла при тепловой деформации в диапазоне температур от минус  $t_{к\ мин}$  до  $t_{к\ макс}$ ».

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ИС

#### 3.1. Общие положения

Современные ИС характеризуются резким повышением плотности элементов на кристалле схемы и соответственно повышением требований к тепловым характеристикам. Надежность полупроводниковых ИС непосредственно связана с температурой кристалла. Чем выше температура кристалла, тем в общем ниже надежность ИС. Ряд факторов, ограничивающих надежность ИС, и в их числе миграция металлизации, понижение диэлектрической прочности изолирующих оксидов, деградация электрических параметров схем и пр., активизируются при повышении температуры. Таким образом, одним из важнейших требований обеспечения высокой

надежности ИС является требование тепловой устойчивости, т.е. создание необходимого теплообмена между кристаллом схемы и внешней средой в допустимом диапазоне рабочих температур. Поэтому при проектировании современных ИС очень большое внимание приходится уделять тепловым расчетам схем, рациональному проектированию путей теплоотвода от участков кристалла с большим тепловыделением, минимизаций потерь энергии в схемах.

Для того, чтобы произвести оценку допустимости того или иного режима работы ИС, на нее в технической документации (чаще всего в технических условиях) устанавливается предельная величина теплового сопротивления. Отношение изменения температуры р-п-перехода относительно окружающей среды к мощности, рассеиваемой прибором, характеризуется тепловым сопротивлением переход – среда

$R_{T_{п-с}}$ . Обычно  $R_{T_{п-с}}$  представляет собой сумму тепловых сопротивлений:  $R_T$  переход-корпус и  $R_T$  корпус – среда. Тепловое сопротивление определяется конструкцией и материалами ИС.  $R_{T_{п-к}}$  необходимо учитывать в первую очередь для ИС большой и средней мощности, так как даже при очень хорошем отводе тепла от корпуса нагрев внутренних элементов ИС остается.

Тепловое сопротивление  $R_{T_{к-с}}$  зависит от способов отвода тепла и температуры окружающей среды и имеет в каждом конкретном случае использования ИС свое определенное значение.

Величина теплового сопротивления переход – корпус считается приблизительно равной величине теплового сопротивления кристалл – корпус и определяется отношением допустимой температуры перегрева кристалла относительно корпуса  $\Delta T$  к мощности рассеяния схемы  $P$ :

$$R_{T_{п-к}} = \Delta T / P \quad [\text{град}/\text{Вт}].$$

Тепловое сопротивление кристалл-корпус в случае напайки равно тепловому сопротивлению тела кристалла (тепловое сопротивление припоя на два порядка меньше сопротивления тела кристалла).

В случае приклейки тепловое сопротивление кристалл-корпус практически равно тепловому сопротивлению клея, так как тепловое сопротивление кристалла по сравнению с сопротивлением клея составляет небольшую величину.

Тепловое сопротивление корпус – среда – это отношение перегрева корпуса относительно окружающей среды к мощности, рассеиваемой ИС:

$$R_{T_{к-с}} = (T_C - T_K) / P \quad [\text{град}/\text{Вт}].$$

### **3.2. Методы определения тепловых параметров ИС**

Расчет теплового сопротивления ИС может проводиться несколькими методами. Рассмотрим два из них.

### ПЕРВЫЙ МЕТОД

Отвод тепла от любого нагретого тела осуществляется теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением

1. *Теплообмен излучением.* При постоянной температуре поверхности тела и окружающей среды мощность излучения поверхности с большей температурой может быть выражена следующей формулой:

$$P_r = h_r S (T_n^4 - T_c^4),$$

где  $P_r$  – мощность, отдаваемая излучением, Вт;  $S$  – поверхность теплоизлучения,  $\text{см}^2$ ;  $T_n$ ,  $T_c$  – абсолютные температуры поверхности тела и окружающей среды, К;  $h_r$  – постоянная лучеиспускания, равная произ-

ведению коэффициента относительного лучеиспускания материала  $K_s$  (табл. П.3.1) на постоянную лучеиспускания абсолютно черного тела  $h_0$ , то есть:

$$h_r = K_s h_0.$$

Тогда

$$P_r = K_s h_0 S (T_n^4 - T_c^4), \quad (\text{П.3.1})$$

где  $h_0 = 5,73 \cdot 10^{-12}$  Вт/ $\text{см}^2$ град.

2. *Теплообмен конвекцией.* Естественная конвекция вызывается уменьшением плотности окружающей среды, соприкасающейся с нагретым телом. Считается, что при конвекции на поверхности тела образуется неподвижная пленка охлажденного газа. Через эту пленку проходит мощность

$$P_c = h_c \Delta T S, \quad (\text{П.3.2})$$

где  $h_c$  – коэффициент конвекции пленки;  
 $\Delta T$  – разность температур;  $S$ – площадь,  
 $\text{см}^2$ .

Таблица П.3.1

Алюминий, полированный	0,051
Сталь, никелированная	0,06
Краска, масляная	0,78

Значения коэффициента относитель-  
ного лучеиспускания  
материала

Материал	$K_1$
Кремний	0,9
Керамика (стеклокерамика)	0,8
Никель	0,1
Ковар, позолоченный	0,0
Медь, полированная	0,0
Медь, черная	0,7
Свинец, оксидированный	0,2

В свою очередь,  $\Delta T = T_n - T_k$ .

В воздухе при нормальном атмо-  
сферном давлении для средних температур

$$h_c = K_1 \sqrt[4]{\Delta T} . \quad (\text{П.3.3})$$

Коэффициент  $K_1$  ( $\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{град}^{0,25}$ ) равен:

$1,86 \cdot 10^{-4}$  – для боковой поверхности

корпуса;

$2,48 \cdot 10^{-4}$  – для крышки корпуса;

$1,24 \cdot 10^{-4}$  – для дна корпуса.

Подставляя эти значения, получим

расчетную формулу:

$$P_C = (1,86 S_6 + 2,48 S_K + 1,24 S_D) \cdot 10^{-4} \Delta T^{1,25} \text{ (Вт)}, \quad (\text{П.3.4})$$

где  $S_6$ ,  $S_K$ ,  $S_D$  – соответственно боковая поверхность корпуса, его крышки и дна.

Для ИС объемом до 0,5 см, имеющих форму параллелепипеда, расчет можно проводить по формуле (П.3.2) с учетом формулы (П.3.3), применяя значение  $K_1 = 1,86 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}^{0,25}$ .

### 3. Теплообмен теплопроводимостью.

Мощность в этом случае будет равна

$$P_i = \lambda \frac{S \Delta T}{d}, \quad (\text{П.3.5.})$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/см град; (значения представлены в табл. П.3.2.);  $S$  – площадь, через которую про-

ходит тепловой поток,  $\text{см}^2$   $d$  – толщина теплоизоляционного слоя, см.

**Пример 1.** Рассчитаем тепловые параметры кремниевых интегральных схем диодно-транзистарной логики серии 104 в плоском корпусе 402.14-1.

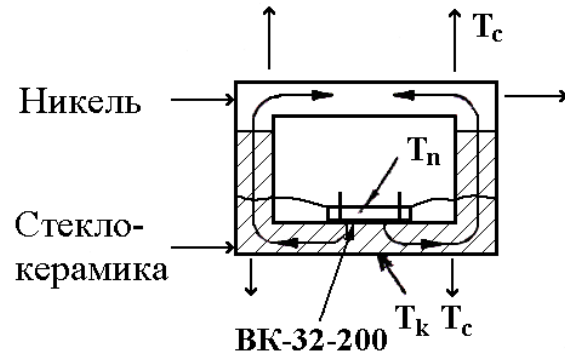
1. Тепловые потоки распространяются в плоском корпусе по направлениям, показанным на рис. П.3.1. Отвод тепла от кристалла может осуществляться теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

### Таблица П.3.2

#### **Значения коэффициента теплопроводности**

для различных материалов

Материал	$\lambda$ , Вт/см·град	Керамика (стеклокерамика)	0,1
Серебро	4,07	Контактол	0,02
Медь	3,84	Клей	0,0028
Золото	3,08	Никель	0,85
Алюминий	2,09	Пластмасса эпоксидная	0,0028
Латунь	1,11	ПСР72	3
Олово	0,65		
Сталь	0,47		
Свинец	0,35		
Кварцевое стекла	0,015		
Стекло	0,00		
Воздух	0,000		
Окись бериллия	1,67		
Кремний	1,2		
Окись алюминия	0,19		
Ковар	0,19		
Стекло (боросиликатное)	0,01		
Эвтектика Ai-Si	2,46		
Эвтектика Sn- Si	2		



$$\begin{array}{c}
 T_n \quad R_{T\ n-k} \quad R_{T\ k-c} \quad T_c \\
 \bullet \text{---} \boxed{\phantom{R}} \text{---} \boxed{\phantom{R}} \text{---} \bullet \\
 R_T = R_{T\ n-k} + R_{T\ k-c}
 \end{array}$$



Рис. П.3.1. Схематическое изображение тепловых потоков в плоском корпусе:  $T_n$ ,  $T_k$ ,  $T_c$  – температура перехода, корпуса и окружающей среды соответственно;  $R_T$  – тепловое сопротивление ИС;  $R_{T\ n-k}$ ;  $R_{T\ k-c}$  – тепловое сопротивление переход – корпус и корпус – среда

2. При расчете примем следующие допущения:

– поверхность кристалла будем считать изотермической, так как активные и резистивные элементы схемы распределяются по всей поверхности, площадь которой составляет  $0,0256\text{ см}^2$ ;

– отводом тепла через внутренние проволочные выводы толщиной  $30\text{ мкм}$  будем пренебрегать, так как суммарная площадь  $11$  выводов составляет всего примерно  $0,01\text{ мм}^2$ , что менее  $1\%$  площади кристалла схемы;

– рассеянием тепла внутри корпуса при тепловом излучении можно пренебречь из-за малых размеров кристалла схемы.

3. Определим количество тепла, передаваемого от кристалла излучением, конвекцией и теплопроводностью.

а) Мощность излучения поверхности кристалла  $P$  определим по формуле (П.3.1). Для расчета примем:  $K_s = 0,9$ ;  $S = 0,5\text{ см}^2$ ;  $T_n = 423\text{ К}$  (максимально допустимая температура перехода ограничивается применяемым клеем ВК-32-200);  $T_c = 398\text{ К}$  (максимально допустимая температура окружающей среды для ИС серии 104 равна  $125\text{ °C}$ ).

Получим:  $P_T = 0,07\text{ мВт}$ .

б) Мощность теплообмена конвекцией подсчитаем по формуле (П.3.2) с учетом формулы (П.3.3), считая корпус ИС серии 104 параллелепипедом. Для кремниевой пластины с разностью температур  $\Delta T_1 = 5\text{ °C}$ ;  $\Delta T_2 = 10\text{ °C}$ ;  $\Delta T_3 = 15\text{ °C}$ ;  $\Delta T_4 = 20\text{ °C}$ ;

$\Delta T_5 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  мощность, соответственно, будет:  $P_{1C} = 0,7 \text{ мВт}$ ;  $P_{2C} = 1,64 \text{ мВт}$ ;  $P_{3C} = 2,7 \text{ мВт}$ ;  $P_{4C} = 3,9 \text{ мВт}$ ;  $P_{5C} = 5,2 \text{ мВт}$ ;

в) По формуле (П.3.4) найдем максимальную разность температур кристалла и корпуса для ИС серии 104. Если предельная мощность рассеяния  $P_t = 18 \text{ мВт}$ ;  $\lambda = 0,0028 \text{ Вт/см}\cdot\text{град}$  для отделяющего кристалл от основания корпуса клея ВК-32-200 толщиной  $d = 0,01 \text{ см}$  и площадью  $S = 0,0256 \text{ см}^2$ , то получим значение  $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

г) Так как при  $\Delta T = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  величина  $P_c < 0,5 \text{ мВт}$ , можно считать, что практически передача тепла от кристалла осуществляется в основном теплопроводностью. Тогда тепловое сопротивление переход – корпус равно:

$$P_{Tn-k} = \frac{2,5 \text{ }^\circ\text{C}}{18 \text{ мВт}} = 0,14 \text{ град / мВт}.$$

4. Определим количество тепла, передаваемого от корпуса схемы тепловым

излучением, конвекцией и теплопроводностью.

а) Корпус теряет энергию при излучении стеклокерамического основания, никелевого колпака и коваровых выводов. Поэтому формула (П.3.1) примет вид:

$$P_r = \sum_i K_{is} h_0 S_i (T_k^4 - T_c^4).$$

При расчете примем для стеклокерамики  $K_c = 0,85$  и  $S = 1,18 \text{ см}^2$ ; для никеля  $K_c = 0,12$  и  $S = 0,6 \text{ см}^2$ ; для позолоченных коварных выводов  $K_c = 0,07$  и  $S = 0,34 \text{ см}^2$  при длине выводов 3 мм. Тогда  $P_r = 0,171 \text{ мВт}$  для предельных температур.

б) Формула (П.3.2) для излучения конвекцией с учетом формулы (П.3.3) для площади корпуса  $S = 1,79 \text{ см}^2$  примет вид:

$$P_c = 3,3 \cdot 10^{-4} (\Delta T)^{5/4},$$

где  $\Delta T = T_K - T_c$ .

Рассчитаем и построим на графике зависимость  $P_c$  от  $\Delta T$ . Из рис. П.3.2 видно, что пренебрегать теплообменом конвекцией корпуса нельзя, особенно при возрастании  $\Delta T$ .

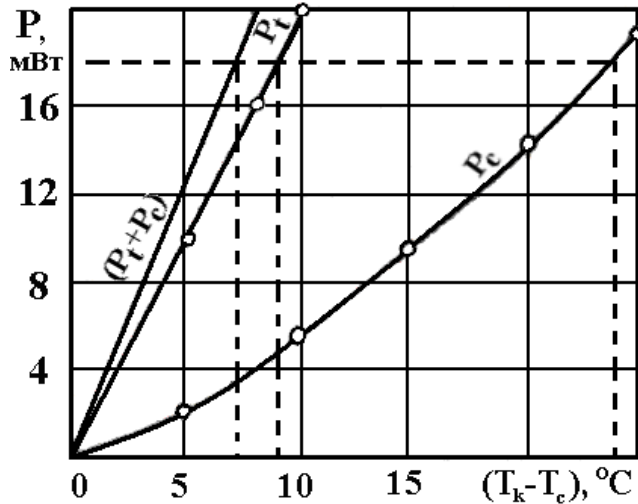


Рис. П.3.2. График зависимости количества рассеиваемого корпусом тепла от разности температур

и вида теплового излучения

в) Формула передачи энергии теплопроводностью (П.3.4) при  $\lambda = 10^{-4}$  мВт/см<sup>2</sup>·град,  $S = 1,18$  см и  $d = 0,06$  см для стеклокерамики будет

$$P_t = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta T (\text{мВт/град}).$$

Построим график зависимости  $P_t$  от  $\Delta T$  и  $(P_c + P_t)$  от  $\Delta T$  (рис. П.3.2.). Из графиков видно, что при максимальной для схем серии 104 мощности рассеяния, равной 18 мВт, температура корпуса выше температуры среды на  $7^{\circ}\text{C}$ . Температура кристалла будет превышать температуру среды на  $9,5^{\circ}\text{C}$  и тепловое сопротивление кристалл (переход) – среда будет  $R_{\text{Тк-с}} = 0,52$  град/мВт.

## ВТОРОЙ МЕТОД

При расчете теплового сопротивления к тепловому потоку, тепловому сопротивлению и разности температур по аналогии с электричеством применяют закон Ома и все теории для последовательного и параллельного включения сопротивлений. Кристалл, припой (контактол или клей) и дно корпуса представим как последовательное соединение однородных слоев, а каждый слой – в виде однородного стержня – и будем считать, что тепло равномерно распределяется на поперечном сечении стержня. Тогда тепловое сопротивление каждого слоя можно найти по формуле:

$$R_T = \frac{d}{\lambda S} \text{ [град/Вт]},$$

где  $d$  – толщина слоя;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $S$  – площадь.

Тепловая схема замещения теплового сопротивления представлена на рис П.3.3.

2. Тепловое сопротивление припоя, контактола или клея рассчитывают по формуле

$$R_{T \text{ припоя, контактола, клея}} = \frac{d}{\lambda ab},$$

где  $d$  – толщина эвтектического припоя, контактола или клея; (принимается для эвтектического припоя  $d = 10^{-3}$  см; для контактола, клея  $d = 10^{-2}$  см);  $a, b$  – размеры кристалла, см.

3. Тепловое сопротивление выводов кристалла рассчитывают по формуле

$$R_{T \text{ выводов}} = \frac{4l}{\lambda \pi D^2 n},$$

где  $\pi D^2 n / 4$  – суммарное сечение выводов, см<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр вывода, см;  $n$  – количество выводов;  $l$  – длина вывода, см.

1. Тепловое сопротивление кристалла рассчитывают по формуле

$$R_{Tk} = \frac{d}{\lambda ab},$$

где  $a, b$  – размеры кристалла, см,

Практически тепловое сопротивление выводов кристалла получается большим, и отводом тепла по ним можно пренебречь,

4. Тепловое сопротивление дна корпуса рассчитывают по формуле

$$R_{\text{Тдна}} = \frac{d}{\lambda S},$$

где  $d$  – толщина дна корпуса, см;  $S$  – площадь дна корпуса, см<sup>2</sup>

5. Тепловое сопротивление кристалл (переход) – корпус по рис. П.3.2. равно

$$R_{\text{Тп-к}} = R_{\text{Тк}} + R_{\text{Ткрепл.}} + R_{\text{Тдна}}.$$

6. Тепловое сопротивление внешних выводов корпуса рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{Твыводов}} = \frac{l}{\lambda S n},$$

где  $l$  – длина вывода, см;  $n$  – число выводов;  $S$  – площадь поперечного сечения вывода, см<sup>2</sup>.

7. Тепловое сопротивление конвекции корпус – воздух с учетом количества тепла передаваемого конвекцией (по закону Ньютона)

$$P_c = 1,16 \cdot \alpha \cdot S (T_{\text{среды}} - T_{\text{корп.}}) \text{ [Вт]},$$

где коэффициент теплоотдачи равен  $\alpha = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}$ ;

$$R_{\text{Тконв}} = \frac{T_{\text{среды}} - T_{\text{корп.}}}{P_c} = \frac{I}{1,16 \cdot \alpha \cdot S_{\text{корп.}}}.$$

8. Тепловое сопротивление корпус – среда рассчитывается по формуле

$$R_{T_{к-с}} = \frac{R_{T_{выводов}} \cdot R_{T_{конв}}}{R_{T_{выводов}} + R_{T_{конв}}}.$$

9. Тепловое сопротивление кристалл (переход) – среда рассчитывается по формуле

$$R_{T_{п-с}} = R_{T_{п-к}} + R_{T_{к-с}}.$$

10. Расчет рассеиваемой мощности проводят по формуле

$$P = \frac{T_k - T_c}{R_{T_{к-с}}} \text{ [Вт]}.$$

**Пример 2.** Рассчитаем тепловые параметры кремниевых интегральных схем диодно-транзисторной логики серии 104 в плоском корпусе 402Д4-1 по второму методу.

При расчете предполагается равномерное распределение температуры по поверхности корпуса.

1. Тепловое сопротивление кристалла при значениях:

$$\lambda \text{ кремния} = 1,2 \text{ Вт/см}^2\text{град (табл.}$$

П.3.2);

$$S \text{ (кристалла)} = 0,0256 \text{ см}^2;$$

$$d \text{ (кристалла)} = 0,04 \text{ см} -$$

равняется

$$R_{T \text{ (кристалла)}} = \frac{0,04}{1,2 \cdot 0,0256} = 1,3 \text{ (град/Вт)}.$$

2. Тепловое сопротивление клея.

Площадь слоя клея равна площади кристалла, толщина клея равна 0,01 см. Коэффициент теплопроводности клея  $\lambda = 0,0028 \text{ Вт/см}^2\text{град}$  (табл. П.3.2)

$$R_{T \text{ (клея)}} = \frac{0,01}{0,0028 \cdot 0,0256} = 140 \text{ (град/Вт)}.$$

3. Тепловое сопротивление выводов кристалла. Длина выводов  $l = 0,35$  см; диаметр  $D = 0,003$  см; число выводов  $n = 11$ ; коэффициент теплопроводности алюминия  $\lambda = 2,09 \cdot \text{Вт/см} \cdot \text{град}$  (табл. П.3.2).

$$R_{T(\text{выводов})} = \frac{0,35 \cdot 4}{2,09 \cdot 3,14 \cdot 0,003^2 \cdot 11} = 2155 \text{ (град/Вт)}.$$

Видно, что величина теплового сопротивления выводов кристалла велика и отводом тепла по ним можно пренебречь.

4. Тепловое сопротивление дна. Теплопроводность стеклокерамики  $\lambda = 0,1$  Вт/см·град (табл.П.3.2).

При  $S_{(\text{дна})} = 1,18 \text{ см}^2$  и толщине дна  $d = 0,06$  см получим

$$R_{T(\text{дна})} = \frac{0,06}{0,1 \cdot 1,18} = 0,51 \text{ (град/Вт)}.$$

5. Тепловое сопротивление кристалл (переход) – корпус равно

$$R_{T_{\text{n-k}}} = 1,3 + 140 + 0,51 = 141,8 \text{ (град/Вт)} \approx 0,14 \text{ (град/мВт)}.$$

Полученное по данному методу значение  $R_{T_{\text{n-k}}}$  полностью совпадает со значением, полученным по первому методу.

6. Тепловое сопротивление 14 внешних выводов корпуса при длине вывода равной  $l = 3$  см, теплопроводности ковары  $\lambda = 0,19$  Вт/см·град (табл.П.3.2) и площади поперечного сечения вывода  $S = 0,043 \cdot 0,015 = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$  равно

$$R_{T(\text{вн. выводов})} = \frac{3}{0,19 \cdot 14 \cdot 6,5 \cdot 10^{-4}} = 1735 \text{ (град/Вт)}.$$



7. Тепловое сопротивление конвекции корпус – среда при площади корпуса  $S = 1,78 \text{ см}^2$  равно

$$R_{T(\text{конвекции})} = \frac{1}{0,16 \cdot 1,38 \cdot 10^{-3} \cdot 1,78} = 349,7 \text{ (град./Вт).}$$

8. Тепловое сопротивление корпус – среда равно

$$R_{T_{k-c}} = \frac{1735 \cdot 349,7}{349,7 + 1735} = \frac{607250}{2085} = 290 \text{ град/Вт} = 0,29 \text{ град./мВт.}$$

9. Тепловое сопротивление кристалл (переход) – среда равно

$$R_{T_{n-c}} = 0,14 + 0,29 = 0,43 \text{ град/мВт.}$$

Расчетное значение  $R_{T_{n-c}}$  несколько меньше значения, полученного первым методом, но значительно ближе совпадает

с экспериментально полученным значением  $0,35 \text{ град/мВт}$ .

10. Рассчитаем рассеиваемую мощность ИС при  $T_{\text{крис. макс.}} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_{\text{среды}} = 25; 70; 85; 100; 125 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$P_{\text{pac } 25} = \frac{150 - 25}{0,43} = 291 \text{ (мВт);}$$

$$P_{\text{pac } 70} = \frac{150 - 70}{0,43} = 186 \text{ (мВт);}$$

$$P_{\text{pac } 85} = \frac{150 - 85}{0,43} = 151 \text{ (мВт);}$$

$$P_{\text{pac } 100} = \frac{150 - 100}{0,43} = 116 \text{ (мВт);}$$

$$P_{\text{pac } 125} = \frac{150 - 125}{0,43} = 58 \text{ (мВт);}$$

Таким образом, до 50 мВт данная конструкция ИС обеспечивает допустимый тепловой режим кристалла при температурах окружающей среды до 125 °С.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ ИС

#### 4.1. Понятие случайного события, случайные величины

Для овладения теорией и практикой изучения надежности полупроводниковых изделий (ППИ) – диодов, транзисторов и интегральных микросхем (ИС) – необходимо научиться оперировать со случайными величинами, т.е. с величинами, которые в результате опыта могут принимать то или иное значение, причем заранее неизвестно, какое именно. Например, случайными величинами будут: величина конкретного параметра для той или иной ИС, время исправленной работы изделия от

начала эксплуатации до его отказа или число отказов от общего числа изделий, поставленных на испытание.

Пусть в результате опыта может появиться или не появиться некоторое событие  $A$ . В этом случае вместо события  $A$  можно рассматривать случайную величину  $X$ , которая равна 1, если событие  $A$  происходит, и равна 0, если событие  $A$  не происходит.

Случайная величина  $X$  называется *характеристикой случайной величины* события  $A$ .

Опыт со случайными величинами может сводиться к схеме случаев или схеме равновозможных результатов. Например, для случая выпадения цифры при бросании монеты ("решка") можно подсчитать:

$$\frac{\text{случай}}{\text{всего случаев}} = \frac{1}{2}.$$

Случай выпадания четной стороны кубика можно также подсчитать:  $3/6 = 1/2$ .

В этих ситуациях вероятность появления события может быть определена заранее – до опыта. Таких случаев встречается мало. Подавляющее большинство задач теории надежности не может быть сведено к схеме случаев.

Как можно определить значение выходного напряжения логического нуля конкретной ИС типа 106ЛБ1 без измерения этого значения или определить вероятность одного отказа ИС из 1000 поставленных в аппаратуру в течение 500 ч непрерывной работы? Каждая из ИС имеет хотя бы небольшие конструктивно-технологические особенности, связанные, например, с изготовлением их разными рабочими, отсутствием идеальной однородности материалов и др. За 500 ч может отказать 1, 2 и более ИС, а может и не отказать ни одна из ИС. Другими словами,

здесь опыт не сводится к "схеме случаев", так как до опыта ничего нельзя сказать о вероятности искомого события, если до этого не было аналогичных испытаний.

В процессе испытаний каких-то однотипных изделий на срок службы они будут выходить из строя. Время отказа для каждого изделия есть величина случайная и теоретически может принимать любые значения – от нуля до бесконечности.

Любое соотношение, которое устанавливает связь между возможными значениями случайных величин и их вероятностями, называется *законом распределения случайной величины*.

Случайные величины бывают дискретными (прерывными) и непрерывными. Например, число отказов – дискретная величина; время между отказами – непрерывная величина. Простейшим видом задания зако-

на случайной величины является таблица, например, такого вида:

Таблица П.4.1


Закон распределения, заданный в виде табл. П.4.1, получил название *ряда распределения*.

#### **4.2. Числовые характеристики случайных величин**

Наиболее полная характеристика случайной величины дается ее функцией распределения, которая указывает, какие значения и с какими вероятностями принимает данная величина. Однако нередко требуются

некоторые более общие представления о случайной величине. Для теории надежности большую роль играют некоторые постоянные числа, получаемые по определенным правилам из функций распределения. Среди этих постоянных, служащих для общей количественной оценки случайных величин, для характеристики их "в целом" особое значение имеют среднее значение (математическое ожидание), дисперсия, среднеквадратичное (стандартное) отклонение, мода и медиана.

Пусть случайная величина  $X$  принимает значения  $X_1, X_2, \dots, X_n$  соответственно с вероятностями  $P_1, P_2, \dots, P_n$ .

Математическим ожиданием случайной величины (средним ее значением) называется сумма произведений всех возможных значений случайной величины на их вероятности:

$$M[x] = \frac{x_1 P_1 + x_2 P_2 + \dots + x_n P_n}{P_1 + P_2 + \dots + P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i P_i}{1} = \sum_{i=1}^n x_i P_i.$$

Для непрерывной случайной величины среднее значение

$$M[x] = \bar{m}_x = \int_0^{\infty} x P(x) dx.$$

Если случайная величина  $x$  распределена в отрезке  $ab$ , то

$$M[x] = \int_a^b \frac{x dx}{b-a} = \frac{a+b}{2}.$$

Среднее значение не является случайной величиной. Оно представляет числовую характеристику распределения вероятностей случайной величины.

Для оценки разброса значений случайной величины около ее среднего значения используется несколько числовых характеристик, важнейшими из которых являются дисперсия и среднее квадратичное (стандартное) отклонение.

Под *центрированной случайной величиной*, соответствующей случайной величине  $x$ , понимают отклонение случайной величины от ее математического ожидания:

$$x^0 = x - \bar{m}_x = x - \bar{x}.$$

*Дисперсией* случайной величины называется математическое ожидание квадрата соответствующей центрированной величины:

$$D(x) = M[(x - \bar{m}_x)^2].$$

Несложные алгебраические преобразования приводят к равенству

$$D(x) = M[x^2] - (M[x])^2.$$

Дисперсию можно рассматривать как меру рассеяния (разбросанности) значений случайной величины от ее среднего значения.

*Среднеквадратичное (стандартное) отклонение* случайной величины равно положительному значению корня квадратного из математического ожидания квадрата отклонения случайной величин от ее математического ожидания:

$$\sigma(x) = +\sqrt{D(x)} = +\sqrt{M[(x - \bar{m}_x)^2]}.$$

Кроме математического ожидания (среднего значения) положение случайной величины на числовой оси определяется еще такими характеристиками рассеяния, как наименьшее (минимальное) и наибольшее (максимальное) значение, мода и медиана случайной величины, квантили.

*Модой* ( $M_0$ ) случайной величины называют ее наибольшее вероятное значение. Модой непрерывного распределения, имеющего плотность  $F(x)$ , называется абсцисса  $x$ , при которой  $P(x)$  достигает максимума. Распределение может быть одно-модальным, двух- и более модальным и антимодальным.

Значения случайной величины могут быть упорядочены в возрастающей или убывающей последовательности. Значение случайной величины, которое делит упорядоченный ряд на две равные части, называется *медианой*.

Медианой ( $Me$ ) случайной величины  $x$  называется такое ее значение, для которого

$$R(x < Me) = R(x > Me) \text{ или } \int_0^{Me} F(x) dx = 0,5.$$

Разница между максимальным и минимальным значением случайной величины называется *размахом (шириной)* диапазона рассеяния:  $R = x_{\max} - x_{\min}$

$P$ -квантилем ( $x_p$ ) называется значение случайной величины, удовлетворяющее условию  $P(x \leq x_p) = F(x_p) = P$ , где  $P$  принимает значения  $0 < P < 1$ .

Специальные квантили:

$X_{0,25}$  и  $X_{0,75}$  – квартили;

$X_{0,50}$  – медиана;

$X_{0,10}$ ,  $X_{0,20}$ , ...,  $X_{0,90}$  – децили;

$X_{0,01}$ ,  $X_{0,02}$ , ...,  $X_{0,99}$  – проценти.

**Пример 1.** Проводились исследования влияния отбраковочных испытаний циклической сменой температур и длительного температурного воздействия на прочность клеевого соединения кристалл – корпус интегральных схем типа 106ЛБ1. Посадка кристаллов площадью  $1,2 \text{ мм}^2$  в корпус типа 401.14-3 осуществлялась на клей ВК-32-200. Полученные данные представлены в табл. П.4.2.

Таблица П.4.2

Значение разрушающего усилия сдвига, МПа			
I	II	III	IV
Перед герметизацией ИС	После отбраковочных испытаний	После 100 термоциклов	После термической обработки в течение 1000 ч при $T = 125^\circ\text{C}$
1,1	2,1	3,3	4,0
1,8	3,0	2,0	3,5
1,9	2,0	2,3	3,1
0,8	1,5	3,0	2,6
1,8	1,0	1,9	3,1
2,0	2,6	3,5	3,3



				ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МПА							
				$x_{\min}$	$x_{\max}$	R	$\bar{x}$	D(x)	$\sigma(x)$	МО	
0,7	2,0	1,8	2,3	Операция							
0,9	3,0	2,0	3,0								
0,7	3,9	2,0	4,1								
1,4	2,9	3,6	3,6	I	0,6	2,0	1,4	1,26	0,2	0,45	1,1
0,6	2,9	2,3	3,7	II	1,5	3,9	2,4	2,41	0,4	0,63	2,0
0,8	2,0	1,6	3,9	III	1,4	3,6	2,2	2,42	0,46	0,68	2,3
1,1	3,7	3,1	4,4	IV	2,3	4,4	2,1	3,5	0,29	0,54	3,1;4,1
0,9	1,9	1,4	3,2								
1,3	2,4	3,3									
1,6	1,8	3,0									
1,3	2,2	2,3									
1,1	2,0	1,4									
2,0	1,8	2,3									
1,4	2,6	2,3									

Для практического определения медианного и модального значений необходимо исходные значения (табл. П.4.1) разделить в виде возрастающего ряда (табл. П.4.4.).

Таблица П.4.4

Номер в возрастающем ряде	ЗНАЧЕНИЯ X, МПА ПОСЛЕ ОПЕРАЦИИ			
	I	II	III	IV
1	0,6	1,5	1,4	
2	0,7	1,8	1,4	
3	0,7	1,8	1,6	
4	0,8	1,9	1,8	
5	0,8	2,0	1,9	

Определим числовые характеристики распределения полученных значений разрушающего усилия сдвига кристалла. Полученные данные представим в табл. П.4.3. Значения моды и медианы найдены по табл. П.4.4.

Таблица П.4.3

6	0,9	2,0	2,0
7	0,9	2,0	2,0
8	1,1	2,0	2,0
9	1,1	2,0	2,3
10	1,1	2,1	2,3
11	1,3	2,2	2,3
12	1,3	2,4	2,3
13	1,4	2,6	2,3
14	1,4	2,6	3,0
15	1,6	2,9	3,0
16	1,8	2,9	3,1
17	1,8	3,0	3,3
18	1,9	3,0	3,3
19	2,0	3,7	3,5
20	2,0	3,9	3,6

чение для значений 10-го и 11-го изделий. Зачастую стабильный технологический процесс изготовления ППИ характеризуется пределом разброса параметров, равным  $\pm 3\sigma$ , относительно среднего значения. Тогда значения параметров, характеризующих технологический процесс, запишем в табл. П.4.5.

4,0 | **Таблица П.4.5**

Операция	ЗНАЧЕНИЕ ЧИСЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК			
	X, МПа			
	$\bar{x}$	$\pm 3\sigma$	$\bar{x} - 3\sigma$	$\bar{x} + 3\sigma$
I	1,26	1,35	*	2,61
II	2,41	1,89	0,52	4,3
III	2,42	2,04	0,4	4,46
IV	3,51	1,62	1,88	5,12

\* Значение меньше нуля не записывается.

В распределенном по возрастанию или убыванию ряде значений при нечетном числе изделий величина значений среднего в ряде и будет медианным значением. В случае четного числа изделий медианальное значение будет равно среднему значению двух значения изделий у середины ряда. Например, для 20 изделий медианным значением будет среднее зна-

Анализируя табл. П.4.3, П.4.4, П.4.5, можно сделать следующие выводы:

1. Прочность клеевого соединения увеличивается после воздействия отбраковочных испытаний и термотренировки при температуре 125 °С, что видно по увеличению минимального, максимального и среднего значений по операциям.

2. Воздействие 100 термоциклов несколько снижает прочность клеевого соединения по сравнению с предшествующим состоянием, что видно по минимальному и максимальному значениям, хотя среднее значение остается в тех же пределах.

3. Распределения значений разрушающих усилий сдвига по операциям I, II, III – одномодальные, по операции IV – двухмодальное.

4. Разброс значений разрушающего усилия сдвига кристаллов для данной конструкции ИС на всех видах технологиче-

ских операций и испытаний укладывается в пределы разброса  $\pm 3\alpha$ , что говорит о стабильности этого техпроцесса.

### **4.3. Графическая обработка совокупности случайных величин**

Полученные статистические данные располагают в порядке возрастания значений случайных величин и для каждого значения указывают число его повторений. Варианты значений величины, перечисленные в порядке их возрастания с указанием для каждого значения числа его повторений, называют *рядом распределений*. Число повторений каждого значения случайной величины называется его *абсолютной частотой*.

Сумма всех абсолютных частот в ряду распределения равна общему количеству измерений, называемому *объемом сово-*

*купности*. Относительную частоту, представляющую собой отношение каждой абсолютной частоты к объему совокупности, выражают в долях (объем совокупности принимают за 1) или в процентах.

Простейшей формой графического представления ряда распределений является *полигон*. Для его построения в прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывают значения случайной величины, а по оси ординат – соответствующие им частоты (абсолютные или относительные). Полигон может быть построен и для интегральной формы распределений. Более удобной и наглядной формой графического представления интервальных рядов является *гистограмма*.

Для построения гистограммы на оси абсцисс откладывают интервалы распределения, на каждом интервале как на основании строят прямоугольник, высота которого (ордината) равна абсолютной или от-

носительной частоте для данного интервала.

При определении ширины интервала может быть использовано правило Старджесса для нахождения минимального числа интервалов  $K$ , на которые нужно разбить разность между двумя крайними значениями:  $K = 1 + 3,31gN$ , где  $N$  – размер выборки, т.е. количество случайных величин.

Ширину интервала можно уменьшить, сделав ее пренебрежимо малой; в этом случае вертикальные линии можно не изображать, а огибающая будет представлять собой непрерывную кривую, изменяющуюся в зависимости от переменной  $x$ .

Вероятность попадания случайной величины внутрь промежутка  $(x_1, x_2)$  равняется сумме всех его абсолютных частот для бесконечно малых интервалов внутри промежутка  $(x_1, x_2)$ . Эта вероятность обозначается как  $P(x_1 \leq x \leq x_2)$ .

Вероятность того, что измерение попадает внутрь промежутка ( $X_{\min}$ ,  $X_2$ ) называется *интегральным (кумулятивным)* законом распределения; определяется как

$$P(x) = \int_{x_{\min}}^{x_2} f(x) dx$$
 и численно равна площади

под интегральной кривой.

Построение рядов распределений и их графическое изображение является первым шагом в проведении анализа состояния технологического процесса. Сопоставление ширины гистограммы распределения с ее полем допуска и визуальная оценка формы гистограммы позволяют качественно оценить состояние технологического процесса и установить, какие меры следует предпринять для его совер-

шенствования или устранения нарушений. Для нормального отлаженного технологического процесса, обеспечивающего получение параметра качества с технологическим запасом относительно производственного допуска (как правило,  $\pm 3\sigma$ ), ширина гистограммы существенно меньше ширины допуска, а интервал с максимальной частотой находится примерно по середине поля допуска.

Построение *интегрального распределения* случайной величины также используется для статистического анализа. Оно показывает, сколько изделий (или какой их процент) имеет значение параметра, меньше какого-либо установленного значения. Мерой разброса измеряемых пара-

метров служит наклон кривой распределения: чем она круче, тем меньше разброс. Если по гистограмме хорошо видно модальное значение случайной величины, то по интегральному распределению легко находится медиана и квантили.

Для наглядного сравнения наличия зависимостей между двумя различными параметрами совокупности ИС или между значением параметра при нормальной температуре со значением параметра при нормальной температуре со значением этого же параметра при предельных температурах, а также для сравнения первоначальных и последующих или конечных измерений параметров используются *поля корреляции*.

Построение полей корреляции производится следующим образом. На оси абсцисс откладываются исходные значения, а на оси ординат значения

параметра сравниваемого. Для каждого изделия ставят точку на графике, абсцисса и ордината которой соответствует значению параметров исходного и сравниваемого. При едином масштабе для осей абсцисс и ординат биссектриса прямого угла будет обозначать множество тех значений, форма связи которых будет линейной, т.е. они коррелированы между собой. Для определения разброса (например,  $\pm 30$ ,  $\pm 50$  % и т.п.) вычисляют соответствующие величины и проводят из вершины угла прямые. Подсчет точек, попавших внутрь угла, ограниченного биссектрисой и, например, прямой, соответствующей отклонению на

30 %, показывает, какой процент изделия имеет отличающееся значение параметра не хуже 30 %.

**Пример 2.** По данным табл. П.4.2. для операции II построим гистограмму и интегральное распределение.

Анализ табл. П.4.2 показывает, что минимальное значение равно 1,5 МПа, максимальное – 3,9 МПа, т.е. ширина диапазона равна 2,4 МПа. По правилу Старджесса интервалов для построения гистограммы должно быть не менее 6:  $K = 1 + 3,31\lg 20 = 5,29$ . Величина интервала  $\Delta x$  должна быть такой, чтобы величина 1 (0,1 или 10) делилась на величину интервала без остатка, т. е.  $\Delta x = 0,1; 0,2; 0,25; 0,5$ .

Примем  $\Delta x = 0,25$ , тогда количество интервалов будет равно 10. Вся область полученных значений разбивается на от-

дельные интервалы так: I – от 1,5 до 1,75 МПа; II – от 1,75 до 2,0 МПа; III – от 2,0 до 2,25 МПа и т.д. Если значение параметра попадает на границу интервалов, его с равным правом можно отнести как к одному, так и к другому интервалу, добавив по 0,5 частоты попаданий в соседние интервалы. При этом получаются дробные значения. Другой способ: верхнее значение не включается в значение данного интервала, т.е. I – [1,5; 1,75); II – [1,75; 2,0); III – [2,0; 2,25) и т.д. Обозначим принцип подсчета количества значений в интервале для первого случая как [: ], для второго – как [:).

Составим таблицу измеренных значений абсолютной, относительной и кумулятивной частот попаданий в каждый интервал, используя данные табл. П.4.4 (табл. П.4.6), по принципу [:].

По данным табл. П.4.6 построим гистограмму (рис. П.4.1). По оси ординат в масштабе откладываем относительные частоты (в процентах) в виде полочек, параллельных оси абсцисс.

IX	3,5-3,75	1	0,05	5	
X	3,75-4,0	1	0,05	5	
ИТОГО		20	1	100	

Таблица П.4.6

Номер интервала	Диапазон, МПа	Абсолютная частота, шт.	Относительная частота		К <sub>1</sub> ча
			доли	%	
I	1,5-1,75	1	0,05	5	
II	1,75-2,0	5,5	0,275	27,5	
III	2,0-2,25	4,5	0,225	22,5	
IV	2,25-2,5	1	0,05	5	
V	2,5-2,75	2	0,1	10	
VI	2,75-3,0	3	0,15	15	
VII	3,0-3,25	1	0,05	5	
VIII	3,25-3,5	-	-	-	

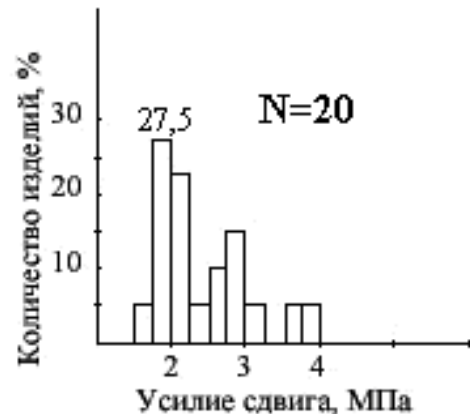


Рис. П.4.1. Гистограмма распределения величин усилия



сдвига кристалла ИС типа 106ЛБ1

На основе значений, указанных в последней колонке табл. П.4.6, построим интегральное распределение по параметру разрушающего усилия сдвига (рис. П.4.2).

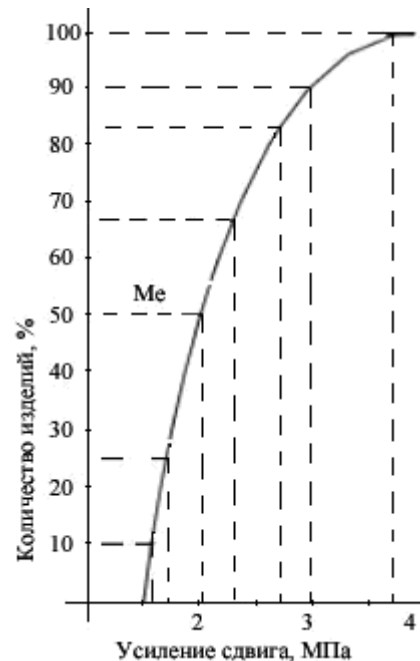


Рис. П.4.2. Интегральное распределение величин усилия сдвига кристалла ИС типа 106ЛБ1

По рис. П.4.1 определяем моду для данного распределения:  $M_0 = (1,75 - 2,0)$  МПа.

На рис П.4.2 находим значения медианы и квантилей:  $M_e = 1,12$  МПа;  $X_{0,1} = 1,62$  МПа;  $X_{0,25} = 1,82$  МПа;  $X_{0,75} = 2,75$  МПа;  $X_{0,90} = 3,3$  МПа.

Если обратимся к данным табл. П.4.2 и сравним с полученными данными  $M_0$  и  $M_e$ , то увидим некоторое расхождение значений этих величин, так как количество изделий, равное 20, не позволяет получить большую достоверность.

**Пример 3.** Определить необходимость измерения параметра выходное напряжение логического нуля  $U_{0L}$  ИС серии 106 при крайних температурах 125 и  $-60$  °С.

Значения параметра  $U_{0L}$  по ТУ следующие:

при  $T = 25$  °С,  $T = -60$  °С  $U_{0L} \leq 0,3$  В;

при  $T = 125$  °С  $U_{0L} \leq 0,4$  В.

Для решения данной задачи были отобраны 20 ИС различных групп серии 106 со значениями параметра  $U_{0L}$ , близкими и равными предельному значению при нормальных условиях, замерены значения этого параметра при температуре 125 и  $-60$ °С (табл. П.4.7) и построены поля корреляции (рис. П.4.3. и П.4.4).

Таблица П.4.7

Номер схемы	Значение $U_{0L}$ , для		
	Нормальные условия	125°С	-60
1	0,26	0,29	0,27
2	0,27	0,32	0,25
3	0,27	0,3	0,28
4	0,26	0,2	0,28
5	0,28	0,29	0,27
6	0,26	0,28	0,27
7	0,3	0,3	0,3
8	0,29	0,3	0,3
9	0,27	0,25	0,3
10	0,3	0,31	0,31

11	0,28	0,33
12	0,27	0,3
13	0,3	0,34
14	0,27	0,33
15	0,28	0,32
16	0,3	0,35
17	0,29	0,3
18	0,28	0,28
19	0,3	0,29
20	0,26	0,28

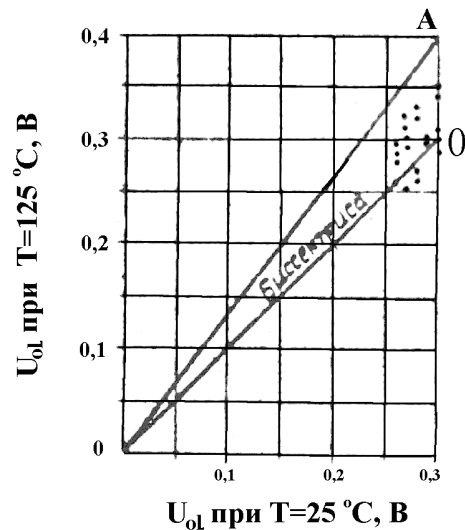


Рис. П.4.3. Поле корреляции по  $U_{0L}$  ИС серии 106 для температур 25 и 125 °С

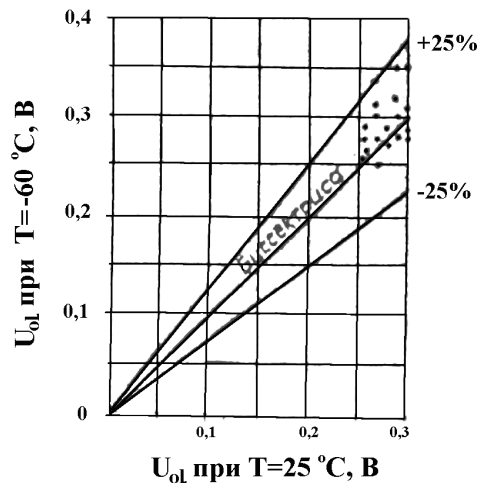


Рис. П.4.4. Поле корреляции по  $U_{OL}$  ИС серии 106 для температур 25 и  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. П.4.3 проведены биссектриса угла и прямая ОА, соединяющая вершину угла с точкой А, имеющей координаты 0,3 и 0,4 В. Точки, находящиеся ниже прямой

ОА, соответствуют требованиям ТУ по параметру  $U_{OL}$  при температуре 25 и  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Так как на рис. П.4.3 все точки расположены ниже прямой ОА, т.е. при проверке ИС серии 106 все схемы соответствуют по параметру  $U_{OL}$  требованиям ТУ на них, то проверку параметра  $U_{OL}$  при температуре  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  ИС серии 106 проводить нецелесообразно.

На рис. П.4.4 видно, что параметр  $U_{OL}$  в основном возрастает до  $+25\%$  при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительно значения, полученного при температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Меньший процент значений параметра  $U_{OL}$  уменьшается при этой температуре. Так как максимальное значение  $U_{OL}$  при температурах  $-60$  и  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , заданное в ТУ, одно и то же, то поле корреляции этого параметра указывает однозначно на необходимость разбраковки ИС серии 106 по параметру  $U_{OL}$  при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**4.4. Статистическая и графическая обработка параметров ИС при длительных испытаниях или при изменении внешних условий**

Зачастую необходимо обработать статистический материал для различных условий эксперимента или для двух партий изделий при одном эксперименте, чтобы сравнить полученные данные. Такие данные для наглядности могут быть представлены в виде таблиц (табл. П.4.8 и П.4.9), гистограмм распределения (рис. П.4.5), интегральных кривых распределения (рис. П.4.6), полей корреляции (рис. П.4.7), графиков зависимостей значений параметров от длительности испытаний (рис. П.4.8 и П.4.9) и кривых стабильностей параметров при длительных испытаниях (рис. П.4.10, П.4.11 и П.4.12).

Таблица П.4.8

Изменение входного тока закрытой схемы  $I_{1H}$  для ИС серии 106 при длительном хранении при температуре  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Время измерения, ч	Значение $I_{1H}$ , мкА			
	миним.	среднее	максим.	
0	6	19	62	
100	7	20	65	
200	9	20	65	
400	9	21	66	
600	10	21	66	
800	10	21	68	
1000	11	23	72	

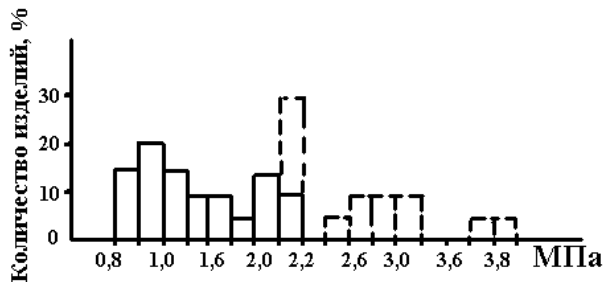


Рис.П.4.5. Гистограмма распределения величины усилия сдвига кристалла ИС типа 106ЛБ1 перед герметизацией и после отбраковочных испытаний (штриховая)

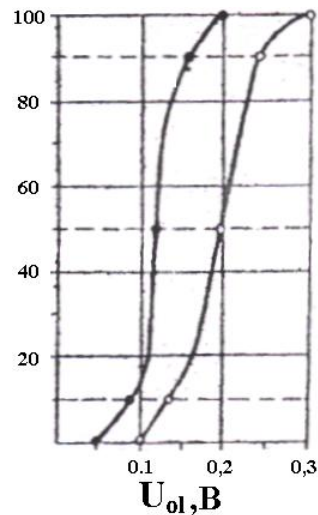


Рис. П.4.6. Интегральное распределение по параметру  $U_{0L}$  ИС серии 106 на входном контроле (-•-•-) и после ЭТТ (-o-o-)

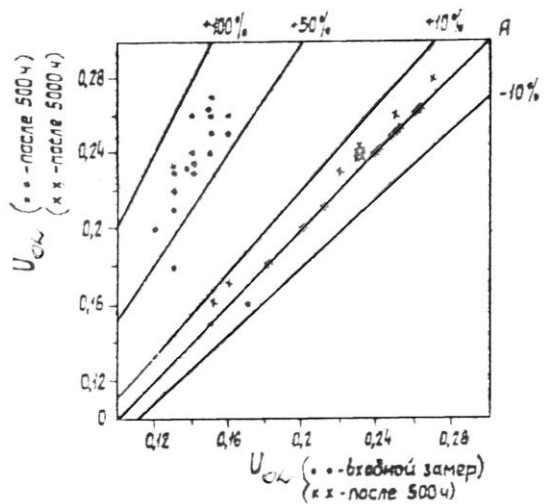


Рис. П.4.7. Поле корреляции значений параметра  $U_{OL}$  для ИС серии 106 для входного замера и 500 ч (точки), для 500 ч и 5000 ч (звездочки)

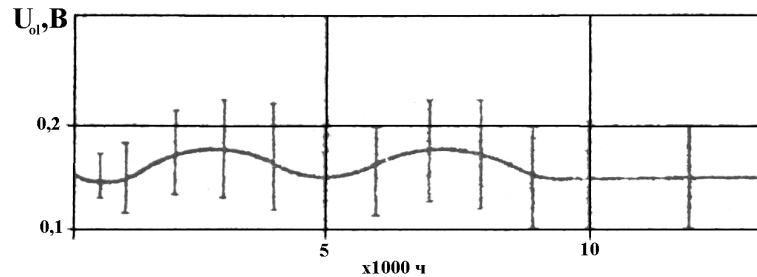


Рис. П.4.8. Зависимость среднего значения  $U_{OL}$  от времени наработки для ИС К106ЛБ1

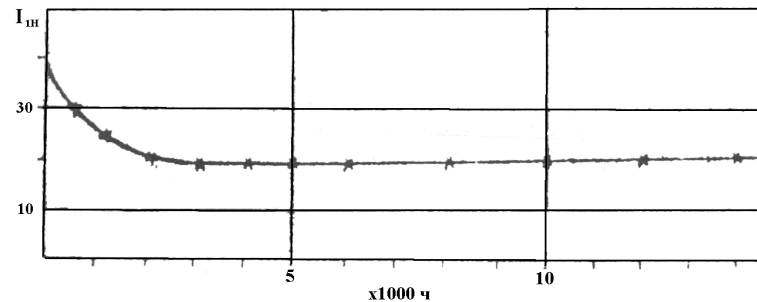


Рис. П.4.9. Зависимость медианного значения  $I_{1H}$  от времени наработки для ИС К106ЛБ1

Из табл. П.4.8 видно что значение  $I_{1H}$  для ИС серии 106 при длительном воздействии температуры  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  несколько растет.

Параметры "выходное напряжение закрытой схемы"  $U_{1H}$ , и "ток входной открытой схемы"  $I_{1H}$  ИС типа К134ИР1 при испытаниях на долговечность стабильны в пределах его 20 %-ного значения (табл. П.4.9)

Гистограммы распределения величин усилия сдвига кристалла ИС типа 106ЛБ1 (рис. П.4.5), выполненные по данным табл. П.4.4 в одном масштабе, показывают, что величина усилий сдвига увеличивается после отбраковочных испытаний



(данные гистограммы выполнены по принципу [;)). Сравнение интегрального распределения по параметру  $U_{0L}$  ИС серии 106 на входном контроле и после электро-термотренировки (ЭТТ) в течение 168 ч показывает увеличение значений этого параметра (рис. П.4.6). Можно подсчитать, что медианное значение увеличилось в 1,6 раза, 10 %-ный квантиль – в 1,3 раза, 90 %-ный квантиль – в 1,5 раза.

Поле корреляции значений параметров  $U_{0L}$  для ИС серии 106 показывает возрастание этого параметра в течение пер-

вых 500 ч испытаний в 1,5 – 2 раза и стабильное значение этого параметра в пределах  $\pm 10\%$  в течение 5000 ч по сравнению с его значением после 500 ч работы (рис. П.4.7).

Кривые зависимости параметра (или его среднего, или его медианного значения, или какого-либо квантильного значения) наглядно показывают изменение параметра от времени испытаний (рис. П.4.8 и П.4.9).

Иногда необходимо сравнить, как параметры совокупности конкретных изделий ведут себя со временем при различных видах испытаний – стабильны ли они со временем и насколько стабильны. С этой целью строятся кривые стабильности на основе метода, предложенного Е.И. Соколовой и В.Д. Дмитриевым. Вычисляется процент годности изделий для  $\pm 50\%$ ,  $\pm 30\%$  и  $\pm 20\%$ -ного исходного значения параметра для различных промежутков времени испытания. При этом, если изделие имело хотя бы раз значение параметра большее,

чем подсчитываемый процент, оно уже в последующем не учитывается для этого процента стабильности. При построении кривой стабильности по оси ординат откладывается процент годности (количество приборов в процентах), удовлетворяющий взятому уровню стабильности для данного времени измерения.

На рис. П.4.10 показаны кривые стабильности параметра для 50, 30 и 20 % годности от исходного значения, а на рис. П.4.11 представлены кривые стабильности для 20 % годности от исходного значения параметра при различных видах испытаний.

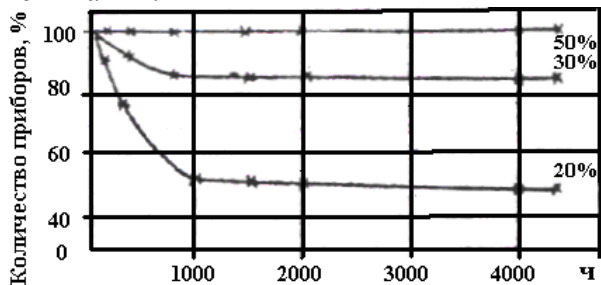


Рис. П.4.10. Кривые стабильности коэффициента усиления по току транзисторов при складском хранении



Рис. П.4.11. Кривые стабильности для 20 %-ного значения параметра  $U_{0L}$  ИС типа 106ЛБ2 при различных видах испытаний

**Пример 4.** Значения выходного напряжения логического нуля  $U_{0L}$ , полученные при испытании на долговечность 20 ИС типа 106ЛБ1, представлены в табл. П.4.10.

Для построения кривой 30- и 50 %-ной стабильности  $U_{0L}$  ИС 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность подсчитаем для каждой точки измерения, у скольких схем изменение параметра произошло не более чем на  $\pm 30$  и  $\pm 50$  % (табл. П.4.11).

Таблица П.4.11

Значение изменения параметра %	Количество ИС, $U_{0L}$ которых не изменились бол 30 и 50 % после испытаний в течение време									
	0	1000	3000	5000	7000	15000	25000	30000	40000	50000
$\pm 30$	20	16	7	6	5	5	4	4	4	4
$\pm 50$	20	19	15	14	12	12	11	11	10	9

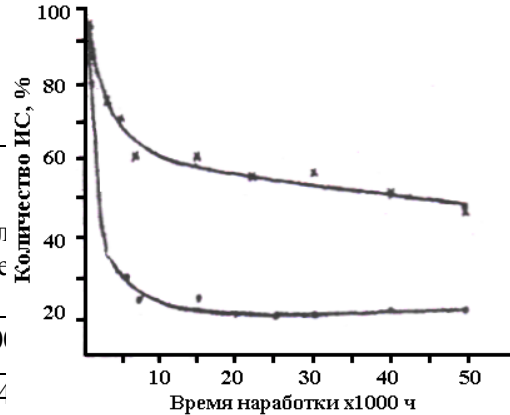


Рис. П.4.12. Кривые стабильности для  
30%- и 50 %-ного  
значения параметра  $U_{0L}$  ИС типа 106ЛБ1

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ИС

По данным табл. П.4.11 построим график кривых стабильности параметра  $U_{0L}$  схем типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность (рис. П.4.12), из которого видно, что  $U_{0L}$  у ИС типа 106ЛБ1 имеет невысокую стабильность при испытаниях на долговечность в течение 50000 ч.

Высокой надежности интегральных схем следует добиваться на этапе их разработки, когда можно устранить причины потенциальной ненадежности. Доводить неудачно разработанную конструкцию, схему, плохо задуманную технологию в процессе производства трудно и дорого. Безусловно, качество производства играет важную роль в том, чтобы изделие было надежным. И хорошо разработанное изделие нужно правильно изготовить, испытать, оттренировать, эксплуатировать. Без этого оно не будет надежным.

Исследование основ обеспечения надежности БИС показывает, что потенциальные причины отказов БИС и ИС малой и средней степени интеграции имеют одинаковый характер. Это – дефекты кристалла (неоднородности, включения в кристалл, дефекты диффузии, ошибки при подготовке поверхности), металлизации (включения, царапины; дефекты травления, утоне-

ния на ступеньках оксида), дефекты оксидного слоя, некачественная приварка проводников к контактным площадкам на кристалле и на траверсах, негерметичность и др. По сравнению с ИС малой и средней степени интеграции элементы БИС имеют меньшие размеры и расположены более тесно, поэтому БИС более чувствительны к некоторым деградационным процессам, дефектам кристалла и оксидного слоя.

Увеличение площади кристалла БИС и введение в ряде случаев многослойной металлизации ужесточают требования к качеству металлизации и делают более вероятным влияние дефектов оксидного слоя на активную область элементов или на активную часть металлизации. Кроме того, увеличение габаритов корпуса и числа выводов вызывает увеличение вероятности некачественной приварки контактных проводников и нарушение герметичности корпуса. В связи с этим вероятность отказов БИС, если качество исходных материалов и

требования к характеристикам технологических процессов изготовления оставить неизменными, должна быть больше, чем вероятность отказов ИС малой и средней степени интеграции.

Определенные трудности представляет нахождение количественных характеристик надежности ИС и, в частности, интенсивности отказов. Существуют экспериментальный метод определения величины  $\lambda$  и метод анализа теоретической модели надежности и расчета  $\lambda$ . При экспериментальном методе количество схем, которые должны быть поставлены на испытания при требуемой статистической достоверности, зависит от числа наблюдаемых отказов.

Ниже приведены данные испытаний при соответствующей интенсивности отказов до наступления 5 отказов при числе испытываемых образцов, равном 1000. Распределение наработки до

отказа принимается экспоненциальными.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКА-	Время испытан
$6 \cdot 10^{-7}$	1
$1 \cdot 10^{-7}$	5, 7
$5 \cdot 10^{-8}$	11
$1 \cdot 10^{-9}$	570

Для ограничения времени испытаний и сокращения количества образцов испытания проводят при максимально возможных нагрузках, но при этом время испытаний остается слишком большим и достигает величины  $10^6 - 10^7$  ч. Данные, полученные при воздействии различных ускоряющих факторов, используют для исследований в теоретических моделях

За основу многих теоретических моделей взяты предположения о том, что распределение вероятности безотказной работы описывается экспоненциальным

законом, а механизмы отказов, вызываемые термическими, механическими и другими нагрузками, стохастически независимы, т.е. интенсивности отказов вследствие этих причин могут складываться

### **5.1. Расчет надежности по интенсивностям отказов на одну структурную единицу ИС**

На основании результатов, накопленных при эксплуатации большого количества ИС в ракетных комплексах «Минитмен» фирмой «Форд Моторс» (США), предложена математическая модель расчета надежности МОП ИС по данным об интенсивностях отказов на одну структурную единицу (площадь кристалла, площадь металлизации, активную площадь кристалла, количество сварных соединений и ступеней диффузии), работающих в активном режиме, т.е. непрерывно под напряжением питания, включенных на нагрузку.

Модель имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda = & \lambda_0 \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_T \cdot A + \lambda_c \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_T \cdot \Pi_E \cdot B + \\ & \lambda_m \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_T \cdot \Pi_E \cdot A + \\ & + \lambda_d \cdot \Pi_Q \cdot C + \lambda_v \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_E \cdot D + \lambda_{кк} \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_T \cdot \Pi_E + \\ & + \lambda_{пд} \cdot \Pi_Q \cdot E + \lambda_{дк} \cdot \Pi_Q \cdot E \end{aligned} \quad (П.5.1)$$

Здесь  $\lambda$  с соответствующими индексами обозначены интенсивности отказов ИС, обусловленные следующими причинами:

$\lambda_0$  – дефектами оксидного слоя под металлизацией, принята равной  $10 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на  $1 \text{ мм}^2$  площади металлизации ИС;

$\lambda_c$  – отказами сварных соединений проводников с контактными площадками, принята равной  $0,37 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на одно соединение;

$\lambda_m$  – дефектами металлизации, принята равной  $3,4 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на  $1 \text{ мм}^2$  площади металлизации;

$\lambda_d$  – дефектами процесса диффузии, принята равной  $0,42 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на одну диффузионную операцию;

$\lambda_b$  – посторонними включениями на поверхности кристалла, принята равной  $0,65 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на  $1 \text{ мм}^2$  площади активных элементов и металлизации;

$\lambda_{kk}$  – некачественным креплением кристалла к корпусу, принята равной  $6 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$ ;

$\lambda_{pd}$  – поверхностными дефектами, принята равной  $0,065 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на  $1 \text{ мм}^2$  площади кристалла;

$\lambda_{dk}$  – структурными дефектами и включениями в кристалл, принята равной  $0,51 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  на  $1 \text{ мм}^2$  площади кристалла.

Сложность ИС в этой математической модели определяется коэффициентами: А – площадь металлизации,  $\text{мм}^2$ ; В – количество мест сварки; С – количество ступеней диффузии; Д – сумма площадей металлизации и активных элементов,  $\text{мм}^2$ ; Е – площадь кристалла,  $\text{мм}^2$ .

Коэффициенты  $P_Q$ ,  $P_T$  и  $P_E$  учитывают внешние факторы:

$P_Q$  – коэффициент качества, т.е. эффективность отбраковки некондиционных ИС при заводских отбраковочных испытаниях, характеризующий степень жесткости приемосдаточных испытаний;

$P_T$  – коэффициент, характеризующий температурный режим эксплуатации ИС в период активной работы и учитывающий явления термической деградации;



$P_E$  – коэффициент, учитывающий другие, кроме температуры окружающей среды, условия эксплуатации ИС.

Для ИС, испытываемых по условиям класса А военного стандарта США № 883, коэффициент  $P_Q$  принимается равным 1; для ИС, испытываемых по условиям класса В того же стандарта, – 2, а по условиям класса С (без термотренировки) – 16. Для коммерческих ИС с термоэлектротренировкой он принимается равным 90 (тренировка 168 ч при температуре 125 °С); и при отсутствии тренировки – 150, в пластмассовом корпусе – 300.

Значения коэффициента  $P_T$  определяются с учетом формулы Аррениуса в предположении, что интенсивность отказов при увеличении температуры будет увеличиваться по экспоненциальному закону. Значения коэффициента  $P_T$  для раз-

ных температур, при которых работают ИС, следующие:

$T, ^\circ\text{C}$	25	55	75	100	125	150	175	200	250
$P_T$	1,0	2,0	3,3	6,1	11,1	21,0	37,8	70,0	230

Коэффициент условий работы схемы  $P_E$  учитывает влияние условий окружающей среды (повышенной влажности, вибрации, ударов, соляной атмосферы и др.) на снижение надежности ИС. Значение коэффициента  $P_E$  для условий средней тяжести принимается равным 4, для наиболее тяжелых (но в пределах технических условий ИС) – 8.

Приведем для примера расчет надежности кремниевых ИС типа КР1043ВГ1 (контроллер периферийных устройств для ВМ), выполненных по МОП-технологии изложенным выше способом. Исходные

данные приведены в табл. П.5.1. Единицы обозначений указаны выше.

Подсчитаем интенсивность отказов по формуле (П.5.1).

$$\begin{aligned} \lambda &= 10^{-9} \cdot (10 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 9,31 + 0,37 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 56 + \\ &\quad 3,4 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 9,31 + \\ &+ 0,42 \cdot 300 \cdot 4 + 0,65 \cdot 300 \cdot 1 \cdot 23,94 + 6 \cdot 300 \cdot 2 \cdot 1 + \\ &\quad 0,065 \cdot 300 \cdot 26,1 + \\ &+ 0,51 \cdot 300 \cdot 26,6) = 300 \cdot 10^{-9} (186 + 41,44 + \\ &\quad 63,308 + \\ &+ 1,68 + 15,561 + 12 + 1,6965 + 13,566) = \\ &= 300 \cdot 10^{-9} \cdot 335,2512 = 1,0 \cdot 10^{-4} (1/\text{ч}). \end{aligned}$$

Таблица П.5.1

Обозначение параметров	Величина параметра
$\lambda_0 \cdot 10^9$	10
$\lambda_c \cdot 10^9$	0,37
$\lambda_m \cdot 10^9$	3,4

$\lambda_d \cdot 10^9$	0,42
$\lambda_B \cdot 10$	0,65
$\lambda_{\text{кк}} \cdot 10^9$	6
$\lambda_{\text{пд}} \cdot 10$	0,065
$\lambda_{\text{дк}} \cdot 10^9$	0,51
A	9,31
B	56
C	4
D	23,94
E	26,6
$\Pi_Q$	300
$\Pi_T$	2,1
$\Pi_E$	1

## 5.2. Расчет надежности по методу оценки сложности ИС и влияния воздействующих факторов

### 5.2.1. Общий подход

Данный расчет надежности ИС приведен в американском справочнике MIL-

HDBK-217, в котором имеются разъяснения и некоторые отличия от отечественных понятий. Сокращения МИС, СИС, БИС обозначают соответственно ИС с малым, средним и большим уровнями интеграции.

К МОП относятся все полупроводниковые ИС со структурой «металл – оксид», которые включают n-МОП, p-МОП, КМОП- МНОП-схемы на различных подложках, таких как сапфир, поликристаллический или монокристаллический кремний.

ИС, содержащие менее чем 100 вентилях (приблизительно 400 транзисторов), считаются схемами малого и среднего уровня интеграции.

В отечественной практике ИС содержащая до 10 элементов компонентов включительно, считается схемой с малой степенью интеграции, а ИС, включающая от 11 до 100 элементов и компонентов

включительно – схемой среднего уровня интеграции.

Более сложные схемы (их сложность определяется числом вентилях или количеством транзисторов, равным 4 на 1 вентиль) считаются схемами высокого уровня интеграции (БИС). Не делается различий между монолитными цифровыми схемами малого и среднего уровня интеграции, поскольку для них предназначается одна и та же модель. Также нет различий между коэффициентами сложности для МОП и биполярных приборов, поскольку коэффициенты, которые определяют сложность, не зависят от особенностей технологии.

Для цифровых ИС число вентилях определяют исходя из логических диаграмм прибора, а при их отсутствии – посредством деления числа транзисторов на 4. Если J – K или R – S триггеры являются частью более сложной схемы, то считают,

что каждый из них эквивалентен 8 вентилям. В данном справочнике вентиляем считают устройство, осуществляющее одну из следующих функций: «И», «ИЛИ», «НЕ – И», «НЕ – ИЛИ», «ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ИЛИ», а также инверторы.

На монолитные запоминающие устройства (ЗУ) из-за их высокого отношения "вентиля на вывод" модели для ИС с малым, средним и высоким уровнем интеграции не распространяются. Их коэффициенты сложности зависят от числа бит и определяются из двух типов соотношений, различных для основных категорий монолитных запоминающих устройств: память с произвольной выборкой ЗУПВ и постоянная память ПЗУ. Однако в указанном справочнике постоянная память команд (ППК) и ассоциативная память (АП) относятся к тем же категориям, что и ЗУПВ и ПЗУ соответственно, поэтому для них применяются те же самые модели. Для

сложных (больших, чем двойные восьмибитовые) статических и динамических сдвиговых регистров необходимо использовать модель ПЗУ с битовым счетом; для сдвиговых регистров с меньшей сложностью – модель для цифровых интегральных схем с малым и средним уровнем интеграции. Для линейных схем, как МОП, так и биполярных, представлена одна и та же модель, коэффициенты сложности которой зависят от числа транзисторов.

В основу всех моделей монолитных ИС положено понятие  $\lambda_T + \lambda_M$  аддитивной модели, т.е.  $\lambda = \lambda_T + \lambda_M$ .

Здесь  $\lambda$  – общая интенсивность отказов для монолитных схем;  $\lambda_T$  – составляющая интенсивности отказов, обусловленная деградацией параметров во времени. Эта деградация определяется механизмами, которые ускоряются температурой и электрической нагрузкой.  $\lambda_T$  определяется

главным образом явлениями, которые подчиняются зависимости типа Аррениуса;  $\lambda_m$  – составляющая интенсивности отказов из-за механических причин (воздействие среды) и представляющая механизмы отказа, обусловленные непосредственными или косвенными механическими нагрузками (например, нагрузками, вызванными тепловым расширением)

На рис П.5.1 показана структурная схема для оценки интенсивности отказов, по которой рекомендуется делать расчет  $\lambda$ .

Для того, чтобы прогнозирование обладало ценностью, оно должно быть своевременным.

Качество ИС оказывает непосредственное влияние на интенсивность отказов и учитывается в модели в виде коэффициента  $P_Q$ . Для учета воздействия условий

эксплуатации на величину надежности ИС в модели вводится коэффициент  $P_E$ .

Условия эксплуатации для различных групп аппаратуры представлены в табл. П.5.2.



Рис. П.5.1. Структурная схема для оценки интенсивности отказов

Таблица П.5.2

Условия эксплуатации и их условное обозначение для различных групп аппаратуры

ГРУППА (ВИД) АППАРАТУРЫ	Усл. обозначение
Наземная в идеальных условиях	
В условиях космического полета	
Наземная стационарная	
<b>Наземная, подвижная, переносная</b>	
Военно-морская, защищенная	

<b>Военно-морская, незащищенная</b>	
Бортовая, в условиях обитаемого отсека транспортного самолета	
Бортовая, в условиях обитаемого отсека истребителя	
Бортовая, в условиях необитаемого отсека транспортного самолета	
Бортовая, в условиях необитаемого отсека истребителя	
В условиях запуска ракет или космических кораблей (спутников)	

Интенсивность отказов для указанных ИС вычисляется по формуле:

$$\lambda = P_L \cdot P_Q (C_1 P_{T1} + C_2 P_E) P_P,$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов ИС (отказы/10<sup>6</sup> ч);  $P_L$  – показатель настроенности технологического процесса, его величина определяется по табл. П.5.3;  $P_Q$  – коэффициент уровня качества (табл. П.5.4);  $P_{T1}$  – коэффициент температурного ускорения (табл. П.5.5);  $P_E$  – коэффициент жесткости условий эксплуатации (табл. П.5.6);  $C_1, C_2$  – коэффициенты сложности схемы, зависящие от числа вентилях в ИС. Величины  $C_1, C_2$  определяются по табл. П.5.7.;  $P_P$  – коэффициент, учитывающий количество выводов (см. примечание к табл. П.5.7.)

**5.2.2. Монолитные биполярные и МОП-цифровые ИС малого и среднего уровня интеграции (менее чем 100 вентилях)**

Таблица П.5.3

## **Коэффициенты настроенности технологического процесса $\Pi_L$**

Коэффициент настроенности технологического процесса равен 10 при любых условиях, указанных ниже:

- (1) новая схема в стадии освоения производства;
- (2) если произошли кардинальные изменения в конструкции или в технологическом процессе;
- (3) если был продолжительный перерыв в производстве или произошло изменение состава обслуживающего персонала (радикальное).

Можно ожидать, что значение коэффициента –  $\Pi_L$  будет равно 10 до тех пор, пока условия производства и контроль не стабилизируются. Этот период может продолжаться до 6 месяцев непрерывного производства.  $\Pi_L = 1,0$  при всех условиях производства, не установленных в пунктах (1), (2), (3), перечисленных выше.



Таблица П.5.5.

Коэффициенты ускорения в зависимости  
от температуры

перехода П<sub>Е</sub>

T <sub>j</sub> (°C)	П <sub>т1</sub>	П <sub>т2</sub>	T <sub>j</sub> (°C)	П <sub>т1</sub>	П <sub>т2</sub>
25	0,10	0,10	75	1,0	5,0

27	0,11	0,12	77	1,1	
29	0,12	0,14	79	1,2	
31	0,14	0,17	81	1,3	
33	0,15	0,20	83	1,4	
35	0,17	0,24	85	1,5	
37	0,19	0,29	87	1,6	1
39	0,21	0,34	89	1,7	1
41	0,23	0,40	91	1,8	1
43	0,25	0,47	93	2,0	1
45	0,28	0,56	95	2,1	1
47	0,30	0,65	97	2,3	2
49	0,33	0,76	99	2,5	2
51	0,36	0,89	101	2,6	2
53	0,40	1,0	103	2,8	2
55	0,44	1,2	105	3,0	3
57	0,48	1,4	110	3,6	4
59	0,52	1,6	115	4,2	5
61	0,57	1,9	120	4,9	7
63	0,62	2,2	125	5,7	9

65	0,67	2,5	135	7,6	155
67	0,73	2,9	145	10,0	250
69	0,79	3,3	155	13,0	393
71	0,86	3,8	165	17,0	607
73	0,93	4,4	175	22,0	918

$T_{окр.ср.} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , если количество вентиляторов значительно меньше 30 или если число транзисторов для линейных ИС меньше 120;  
 $T_{окр.ср.} + 13 \text{ }^\circ\text{C}$ , если количество вентиляторов больше 30 или если число транзисторов в линейных ИС больше 120, а также для всех ЗУ.

Примечания:

1. Если величина температуры перехода  $T_j$  неизвестна, то следует пользоваться следующим приближением для всех типов ИС, кроме маломощных ТТЛ ИС и МОП ИС:

$T_j = T_{окр.ср.} + 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , если количество вентиляторов значительно меньше 30 или если число транзисторов в линейных ИС значительно меньше 120;

$T_j = T_{окр.ср.} + 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , если количество вентиляторов больше 30 или если число транзисторов в линейных ИС больше 120, а также для всех ЗУ.

2. Для маломощных ТТЛ ИС и И<sup>2</sup>Л ИС, если  $T_j$  неизвестна, следует использовать следующие приближения:

Таблица П.5.6

Коэффициент жесткости условий эксплуатации  $P_E$

Условия эксплуатации	$G_B$	$S_F$	$G_F$	$G_M$	$N_S$	$N_U$	$A_{JT}$	$A_{JF}$	$A_{UT}$
$P_E$	0,2	0,2	1,0	4,0	4,0	5,0	2,8	5,6	4,2

### 5.2.3. Монолитные биполярные и МОП-аналоговые ИС

Интенсивность отказов для указанных ИС вычисляется по формуле:

$$\lambda = P_L \cdot P_Q (C_1 P_{T2} + C_2 P_E),$$

где  $\Pi_{T2}$  – коэффициент температурного ускорения (табл. П.5.5);  $C_1, C_2$  – коэффициенты сложности схемы, зависящие от числа транзисторов в ИС (величины  $C_1, C_2$  определяются по табл. П.5.8).



**(содержащие 100 и более вентиляей)**

Интенсивность отказов для указанных ИС определяется по формуле

$$\lambda = P_L P_Q (C_1 P_{T1} + C_2 P_E) P_r,$$

где  $C_1, C_2$  – факторы, учитывающие степень интеграции. По табл. П.5.9 определяется число вентиляей для микропроцессоров. Интенсивность отказов в зависимости от числа вентиляей находят по табл. П.5.10;  $P_r$  – коэффициент количества выводов (примечание к таблице П.5.9 и примечание к табл. П.5.10).

*Таблица П.5.9*

Число вентиляей для микропроцессоров

**5.2.4. Монолитные биполярные и МОП-цифровые ИС высокого уровня интеграции**

Тип ИС	Тип ИС по	Технология изго-	Ч
--------	-----------	------------------	---

(коммерческий)	МП-М-38510	товления ИС	вентилей
1802	470001	КМОП	1375
2901А	440001	ТТЛ	542
6800	400001	МНОП	1300
8080А	420001	МНОП	1100
8085	-----	МНОП	2067
9900	460001	И <sup>2</sup> Л	3100
10800	-----	ЭСЛ	350
Z-80	-----	МНОП	2200

Примечание.  $P_r = 1,1$  для всех микропроцессоров.

### **5.2.5. Монолитные с МОП-структурой и биполярные запоминающие устройства**

Интенсивность отказов для указанных ИС вычисляется по формуле

$$\lambda = \Pi_L \Pi_Q (C_1 \Pi_{T1} + C_2 \Pi_E) \Pi_P,$$

где  $C_1$ ,  $C_2$  – коэффициенты сложности схемы, зависящие от числа бит (табл. П.5.11.);  $\Pi_P$  – коэффициент количества выводов (см. примечание к табл. П.5.11).

Таблица П.5.11

Коэффициент сложности для запоминающих устройств  $C_1$  и  $C_2$

2240	0,030	0,012	0,10	
2560	0,032	0,013	0,11	
4096	0,043	0,017	0,15	
8192	0,065	0,027	0,23	
19216	0,070	0,029	0,24	
10240	0,075	0,031	0,26	
12288	0,083	0,035	0,29	
14848	0,093	0,040	0,33	
16384	0,099	0,042	0,35	

Примечание. При числе выводов кристалла меньше 24  $\Pi_P$  равен 1,0; при числе выводов, равном или больше 24 – 1,1.

Если известными являются только коэффициент площади кристалла и количество соединений, следует разделить площадь кристалла на 2,5. Получится величина, приблизительно равная площади металлизации. Для получения величины, приблизительно равной площади активных элементов, площадь кристалла надо разделить на 5,1.

Знание типа МОП технологии поможет определить количество ступеней диф-

Число бит	ПЗУ		ЗУПВ
	$C_1$	$C_2$	
16	0,0015	0,00048	0,0053
32	0,0023	0,00075	0,0080
64	0,0035	0,0012	0,012
128	0,0053	0,0018	0,019
256	0,0081	0,0029	0,028
320	0,0092	0,0033	0,032
512	0,0012	0,0045	0,043
576	0,013	0,0049	0,046
1024	0,019	0,0070	0,065
1120	0,020	0,0075	0,069
1280	0,021	0,0081	0,074
2048	0,028	0,011	0,099



фузии (для МОП-структур с дополняющими транзисторами оно равно 3, для р-канальных МОП-структур – 1).

Воздействие термоциклирования сказывается на увеличении интенсивности отказов в 4 – 8 раз.

### 5.2.6. Примеры расчета интенсивности отказов ИС

**Пример 1.** ИС типа КР1043ВГ1 (цифровая МОП-технология) эксплуатируется в видеомагнитофонах, т.е. в наземных жилых помещениях при температуре окружающей среды до 35 °С. ИС класса D-1 изготавливается в условиях непрерывного производства.

**Этап 1.** Тип ИС показывает, что прибор поставляется по ЧТУ в пластмассовом корпусе, представляет собой цифровую ИС, изготавливаются по МОП – технологии.

**Этап 2.** Так как данная ИС состоит из 3200 транзисторов и число вентилях будет равно  $3200 : 4 = 800$  (а это более 100 вентилях), то, согласно разделу 5.2.4, применяется следующая модель расчета  $\lambda$ :

$$\lambda = \Pi_L \Pi_Q (C_1 \Pi_{T_1} + C_2 \Pi_E) \Pi_P.$$

**Этап 3.** Из табл. П.5.4 определяем  $\Pi_Q = 300$  для класса качества D-1.

**Этап 4.** Значение  $\Pi_L$ , равное 1,0, находим по табл. П.5.3, поскольку ИС изготавливается непрерывно.

**Этап 5.** По табл. П.5.6 определяем значение  $\Pi_E = 0,2$  для условий эксплуатации  $G_B$ .

**Этап 6.** По табл. П.5.5 находим значение  $\Pi_{T_1}$  в соответствии с примечанием 2. Для этого вначале определяем значение  $T_j$ , равное температуре окружающей среды плюс 25 °С, т.е.  $T_j = 35 + 25 = 60$  °С, как указано в примечании 2, поскольку в схеме

используется более 30 вентиляей.  $P_{T1} = 0,54$ .

**Этап 7.** По табл. П.5.10 находим значения  $C_1$  и  $C_2$ , равные соответственно для 800 вентиляей:  $C_1 = 0,12 \cdot 10^{-6}$  и  $C_2 = 0,043 \cdot 10^{-6}$ ;  $P_p = 1,1$ , так как число выводов равно 28.

**Этап 8.** Рассчитаем  $\lambda$ :

$$\begin{aligned}\lambda &= 1 \cdot 300 \cdot (0,12 \cdot 0,54 + 0,043 \cdot 0,2) \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} = \\ &= 300 \cdot (0,06 + 0,0086) \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} = \\ &= 300 \cdot 1,1 \cdot 0,0686 \cdot 10^{-6} = \\ &= 22,6 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

**Пример 2.** Серийно выпускаемые ИС типа К561ІН2 (6 логических элементов "НЕ") эксплуатируются в видеомангитофонах, т.е. в наземных жилых помещениях при температуре среды до 35 °С. Схема выполнена в пластмассовом корпусе 201.14-1 по МОП-технологии по уровню качества D-1, состоит из 6 вентиляей. Так

как эта схема цифровая с количеством вентиляей менее 100, то воспользуемся формулой раздела 5.2.2:

$$\lambda = P_L P_Q (C_1 P_{T1} + C_2 P_E) P_p.$$

Из таблиц получим следующие исходные данные:

$P_L = 1$ ;  $P_T = 0,22$  (для  $T_i = 35 + 5 = 40$  °С);  $P_Q = 300$ ;  $C_1 = 0,0043 \cdot 10^{-6}$ ;  $C_2 = 0,0074 \cdot 10^{-6}$ ;  $P_p = 1,0$ ;  $P_E = 0,2$ .

$$\begin{aligned}\lambda &= 1 \cdot 300 \cdot (0,0043 \cdot 0,22 + 0,0074 \cdot 0,2) \cdot 10^{-6} = \\ &= 300 \cdot (0,001 + 0,0015) \cdot 10^{-6} = 300 \cdot 0,0025 \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

**Пример 3.** ИС типа КР1005УД1 (сдвоенный операционный усилитель) серийно выпускаются по биполярной технологии в пластмассовом корпусе типа 1102.9 с числом транзисторов, равным 48, по уровню качества D-1. Применяются в видеомангитофонах при температуре ок-

ружающей среды до +35 °С. Так как данная схема аналоговая, воспользуемся формулой раздела 5.2.3:

$$\lambda = \Pi_L \Pi_Q (C_1 \Pi_{T_2} + C_2 \Pi_E).$$

Из таблиц получим следующие исходные данные:

$\Pi_L = 1,0$ ;  $\Pi_{T_2} = 0,37$  (для  $T_j = 35 + 5 = 40$  °С);  $\Pi_Q = 300$ ;  $C_1 = 0,011 \cdot 10^{-6}$ ;  $C_2 = 0,022 \cdot 10^{-6}$ ;  $\Pi_E = 0,2$ .

$$\begin{aligned} \lambda &= 1 \cdot 300 \cdot (0,011 \cdot 0,37 + 0,022 \cdot 0,2) \cdot 10^{-6} = \\ &= 300 \cdot (0,004 + 0,004) \cdot 10^{-6} = \\ &= 300 \cdot 0,0085 \cdot 10^{-6} = 2,56 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)}. \end{aligned}$$

### 5.3. Методы расчетно-экспериментального

прогнозирования надежности на этапе разработки

(по РД 11.0755-90)

На этапе разработки могут быть использованы следующие методы расчетно-экспериментального прогнозирования показателей надежности:

– расчетный метод прогнозирования показателей надежности (метод 1);

– прогнозирование показателей надежности на основе ускоренных испытаний тестовых структур (метод 2).

На этапе проектирования рекомендуется применять метод 1, на этапе разработки после изготовления опытных образцов (для предъявления ОКР к приемке) – метод 2. Метод 2 используется также при изменениях конструкции и технологических процессов изготовления ИС, при их аттестации.

Рассмотрим расчетный метод прогнозирования показателей надежности.

#### 5.3.1. Расчетный метод прогнозирования интенсивности отказов ИС

Данный метод предусматривает использование информации о надежности ранее разработанных и серийно выпускаемых ИС, зависимости надежности ИС и отдельных элементов от воздействия внешних факторов, электрического режима и технологического процесса изготовления.

Расчет проводят по внезапным отказам, предполагая, что отказ любого элемента приводит к отказу ИС.

Расчет проводят с учетом надежности следующих компонентов:

- корпуса;
- соединения кристалла с основанием корпуса;
- внутренних сварных соединений;
- межэлементных соединений (металлизации);
- элементов кристалла;
- прочих.

Общая модель надежности разрабатываемой ИС имеет вид:

$$\lambda_{25} = K_{\Pi}(\lambda_{\text{КЭ}} + \lambda_{\text{ЭК}} + \lambda_{\text{МС}} + \lambda_{\text{ПР}}), \quad (\text{П.5.2})$$

где  $\lambda_{25}$  – интенсивность отказов разрабатываемой ИС при температуре окружающей среды 25 °С;  $K_{\Pi}$  – коэффициент вида приемки, характеризующий систему отбраковочных испытаний (табл. П.5.12);  $\lambda_{\text{КЭ}}$  – интенсивность отказов конструктивных элементов (корпус, установка кристалла в корпус, сварных внутренних соединений);  $\lambda_{\text{ЭК}}$  – интенсивность отказов элементов кристалла;  $\lambda_{\text{МС}}$  – интенсивность отказов межэлементных соединений;  $\lambda_{\text{ПР}}$  – интенсивность отказов прочих элементов кристалла.

Единица измерения интенсивности отказов, получаемая по формулам, – 1/ч.

Таблица П.5.12

Значения коэффициента вида приемки ( $K_{\Pi}$ ) в зависимости

от системы отбраковочных испытаний

Интенсивность отказов конструктивных элементов  $\lambda_{КЭ}$  определяется по формуле:

$$\lambda_{КЭ} = \lambda_{К} + \alpha_{КР}\lambda_{КК} + n\alpha_{С}(\lambda_{С1} + \lambda_{С2}), \quad (П.5.3)$$

Вид приемки	Система отбраковочных испытаний	где $\lambda_{К}$ – интенсивность отказов корпуса (табл. П. 5.13); $\alpha_{КР}$ – коэффициент, зависящий от площади кристалла (рис. П.5.2.); $\lambda_{КК}$ – интенсивность отказов соединения кристалла с основанием корпуса (табл. П. 5.14); $n$ – количество внутренних сварных соединений одного типа; $\alpha_{С}$ – коэффициент, зависящий от площади внутреннего сварного соединения (рис П.5.3); $\lambda_{С1}$ , $\lambda_{С2}$ – интенсивности отказов внутреннего соединения в зависимости от соединенных материалов (табл. П.5.15.)
I	Полный комплекс отбраковочных испытаний, в том числе 168 ч ЭТТ	
II	Полный комплекс отбраковочных испытаний, в том числе 72 ч ЭТТ	
III	То же без применения ЭТТ	
IV	Неполный комплекс отбраковочных испытаний, но с применением ЭТТ	
V	То же, без применения ЭТТ	
VI	Без отбраковочных испытаний	

Таблица П.5.13

Значение интенсивности отказа корпусов ( $\lambda_K$ )

в зависимости от типа корпуса

Тип корпуса	$\lambda_K \cdot 10^7$ ,
2126.48-6	0,15
2123.40-6	0,1
2121.28-5	0,08
2130.24-1	0,07
2103.16-6	0,06
401.14-5	0,05
301.12-1	0,03
301.8-2	0,02

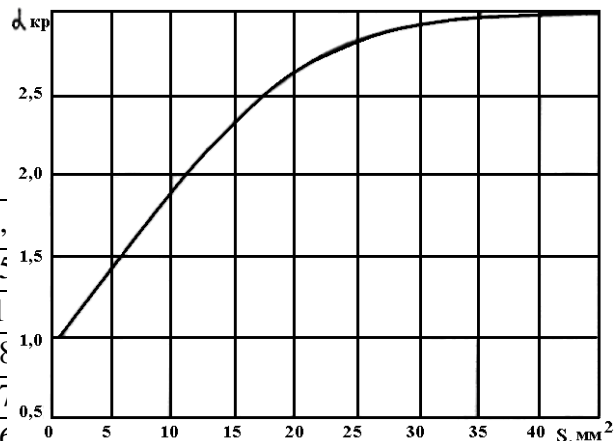


Рис. П.5.2. Зависимость коэффициента  $\alpha_{кр}$  от площади кристалла ИС

Таблица П.5.14

Примечание. Для корпуса, герметизируемого пластмассой, значение  $\lambda_K$  умножается на 2.

Значения интенсивности отказов соединения кристалла с основанием корпуса ( $\lambda_{КК}$ ) в зависимости от способа крепления

Способ крепления	$\lambda_{\text{КК}}$
На клей, контакол	
На эвтектику	С
Методом дисперсионной пайки в корпусах с количеством выводов: до 28 более 28	

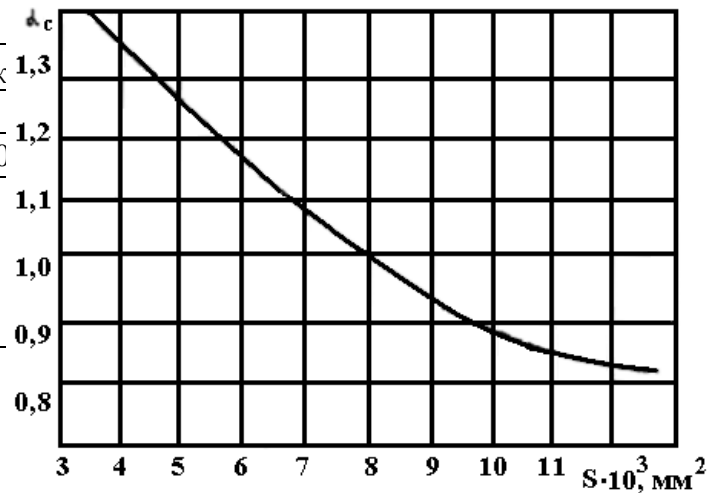


Рис. П.5.3. Зависимость коэффициента  $\alpha_c$  от площади внутренних сварных соединений

Таблица П.5.15

Значения интенсивности отказов одного внутреннего сварного соединения  $\lambda_C$  в зависимости от соединяемых материалов

Соединяемые материалы	$\lambda_C$
Золото – алюминий	0
Золото – золото	0, $\beta = 1$ ; $N_T$ – количество транзисторов в ИС;
Золото – никель	0, $\lambda_T$ – интенсивность отказов транзисторов в
Алюминий – алюминий	0, зависимости от степени интеграции и технологии изготовления (табл. П.5.17), $N_{II}$ – количество электрических переходов; $\lambda_{II}$ – интенсивность отказов электрических переходов, зависящая от технологии изготовления (табл. П.5.18).
Алюминий – никель	0

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от коэффициента электрической нагрузки элемента и температуры перехода ИС (табл. П.5.16);  $\beta$  – коэффициент, характеризующий качество подзатворного оксида (рис. П.5.4.), для биполярных транзисторов

Интенсивность отказов элементов кристалла ( $\lambda_{ЭК}$ ) рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{ЭК} = \alpha \beta (N_T \lambda_T + N_{II} \lambda_{II}), \quad (\text{П.5.4})$$



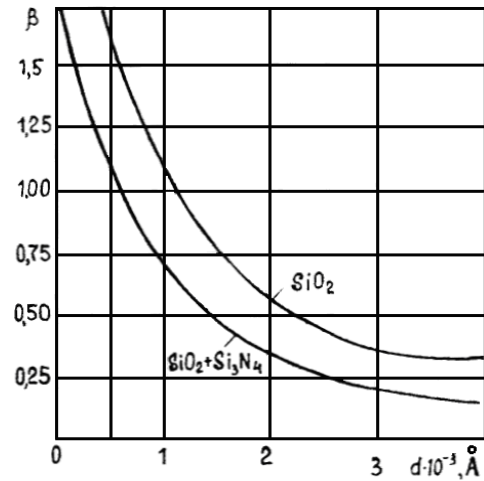


Рис. П.5.4. Зависимость коэффициента качества  $\beta$  от толщины тонкого оксида

Таблица П.5.17

Значение интенсивности отказов транзисторов ( $\lambda_T$ ) в зависимости от степени интеграции и технологии изготовления

Наименование элемента
р-п-р-транзистор, изготовленный биполярной технологией с изоляцией р-п-переходом: I, II степени интеграции III степень интеграции IV степень интеграции
р-п-р-, п-р-п-транзистор, изготовленный на кремниевых структурах с диэлектрической изоляцией (КСДИ) р-п-р-, п-р-п-транзистор, изготовленный на ДИКЭД (диэлектрически изолированный кремний электронно-дырочный) – структурах МДП транзистор I, II степени интеграции III степень интеграции IV степень интеграции V степень интеграции VI степень интеграции

Таблица П.5.18

Значения интенсивности отказов электрических переходов ( $\lambda_{П}$ ) в зависимости от технологии изготовления

Наименование элемента	$\lambda_{П}$
– Диод, резистор, конденсатор, изготовленные: $\lambda_{П}$ по биполярной технологии с изоляцией	
р-п-переходом на КСДИ-структурах	0
на ДИКЭД-структурах	0
элементы, полученные на МДП-структурах	0

Интенсивность отказов межэлементных соединений рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{MC} = \sum_{i=1}^l \lambda_{Mi} \gamma_i S_{Mi}, \quad (П.5.5)$$

где  $\lambda_{Mi}$  – интенсивность отказов металлизации единичной площади, зависящая от ширины дорожки (табл. П.5.19);  $i$  – число разнонагруженных участков,  $i = 1 \dots l$ ;  $\gamma_i$  – коэффициент, учитывающий влияние

электрического режима и температуры на надежность участка металлизации (рис. П.5.5);  $S_{Mi}$  – площадь разнонагруженных участков.

Таблица П.5.19

Значения интенсивности отказов металлизации единичной площади ( $\lambda_{Mi}$ ) в зависимости от ширины металлизированной дорожки

Ширина металлизированной дорожки, мкм	$\lambda_{Mi} \cdot 10^7$ , 1/ч площадь
более 10	0,0
(5 – 10]	0,0
(3 – 5]	0,0
(1 – 3]	0,0

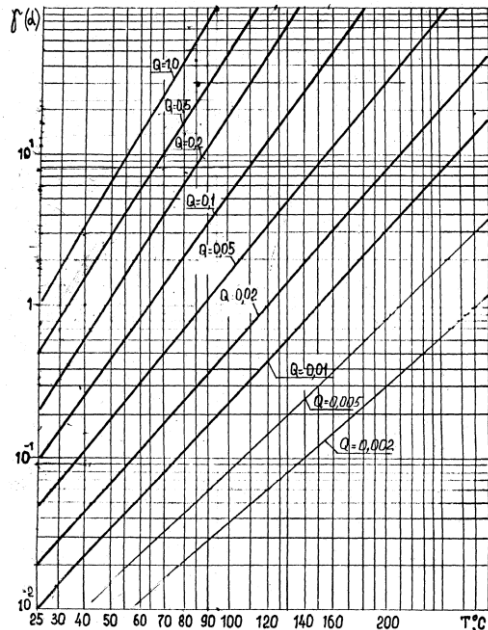


Рис. П.5.5. Зависимость поправочного коэффициента  $\gamma$  от температуры.  $Q$  – отношение фактической плотности тока

к максимально допустимому ( $2 \cdot 10^5 \text{ А/см}$ )

Интенсивность отказов прочих элементов кристалла находится по табл. П.5.20.

Таблица П.5.20

Значение интенсивности отказов прочих элементов кристалла ( $\lambda_{\text{ПР}}$ ) в зависимости от степени интеграции

Наименование элемента
Прочие элементы I – III степени интеграции; IV – VI степени интеграции
Пересечения: металл 1 – SiO <sub>2</sub> – Si металл 1 – SiO <sub>2</sub> – металл 2

В результате расчетов по формулам (П.5.2) – (П.5.5) прогнозируют значение интенсивности отказов ИС для температуры окружающей среды 25 °С.

Для оценки значений интенсивности отказов при более высоких температурах

рассчитывают  $\lambda$  ИС по этим же формулам с учетом следующих дополнений.

В формулах (П.5.2.), (П.5.3) значения  $\lambda_{\text{К}}$ ,  $\lambda_{\text{КК}}$ ,  $\lambda_{\text{С}}$ ,  $\lambda_{\text{ПР}}$  для температуры окружающей среды или корпуса (а для  $\lambda_{\text{ПР}}$  – температуры перехода) свыше 25 °С увеличивают в  $K_y$  раз.

В формуле (П.5.5) для  $\lambda_{\text{МС}}$  значения  $\gamma$  берут для соответствующей повышенной температуры.

Для расчета коэффициента ускорения  $K_y$  используют уравнение Аррениуса:

$$K_y = \exp\left(\frac{E_a}{k}\right) \left( \frac{1}{T_{\text{пер}25} + 273} - \frac{1}{T_{\text{пер}T} + 273} \right), \quad (\text{П.5.6})$$

где  $E_a$  – энергия активации отказов, эВ;  $k$  – постоянная Больцмана, равная  $8,6 \cdot 10^{-5}$  эВ/К;  $T_{\text{пер}25}$ ,  $T_{\text{пер}T}$  – температуры кри-

сталла (перехода) нормальная и повышенная, °С.

Т, ч

Оценку  $K_y$  по данной модели рекомендуется проверить по номограмме, приведенной на рис. П.5.6, при значениях энергии активации, приведенных в табл. П.5.21.

Коэффициент ускорения  $K_y$  для различных температур перехода по рис.П.5.6 определяют в следующем порядке.

На оси абсцисс отмечают точку, соответствующую повышенной температуре перехода Т. Из этой точки проводят прямую линию, параллельную приведенной на графике для установленной энергии активации  $E_a$ . В точке пересечения этой прямой с линией, соответствующей нормальной температуре, по оси ординат определяет значение  $K_y$ .

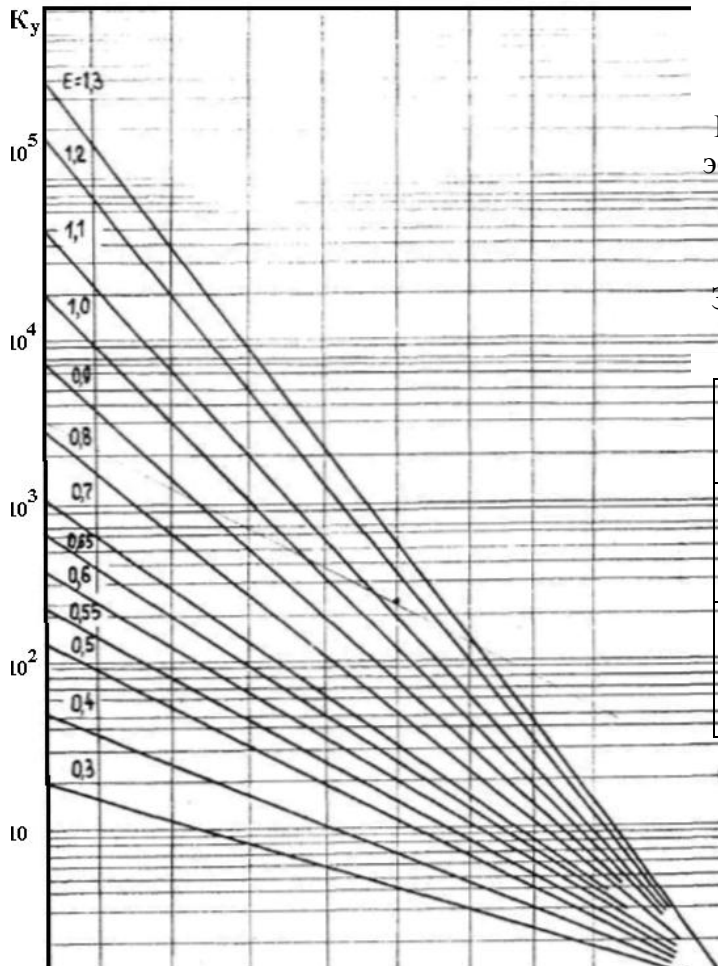


Рис. П.5.6. Номограмма зависимости коэффициента ускорения  $K_y$  от температуры перехода по уравнению Аррениуса  
Таблица П.5.21

Значения энергии активации для элементов конструкции ИС

Элементы конструкции ИС	Эн э ак
Корпус: металлокерамический и металлостеклянный пластмассовый	
Крепление кристалла к основанию корпуса с помощью эвтектики клея, контактола	

Проволочные соединения с контактными площадками кристалла и траверсами корпуса типа Au – Al на кристалле типа Au – Al па траверсе корпуса типа Au – Au на кристалле типа Au – Au на траверсе корпуса типа Al – Al на кристалле типа Al – Al на траверсе корпуса типа Au – Ni на траверсе корпуса	руктивно – технологические данные (КТД) для расчета интенсивности отказов представлены в табл. П.5.22.
Прочие элементы кристалла	

### 5.3.2. Примеры расчета интенсивности отказов ИС

Рассчитаем интенсивность отказов для ИС типов КР1054ГП1 (генератор тестовых сигналов для видеомагнитофонов) и КР1830ВЕ51 (однокристалльная восьмиразрядная микроЭВМ для управления видеомагнитофоном) при эксплуатации при температуре окружающей среды до 35 °С с коэффициентом нагрузки 0,7. Вид приемки относится к VI группе. Исходные конст-





## Расчет интенсивности отказов ИС типа КР1054ГП1

**Этап 1.** Рассчитаем интенсивность отказов конструктивных элементов  $\lambda_{кэ}$  по формуле П.5.2.

Исходные данные найдем в соответствующих таблицах и рисунках:

$\lambda_{к} = 0,04 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.13 для корпуса типа 301.8-2 пластмассового варианта);

$\alpha_{кр} = 1,27$  (рис. П.5.2 для  $S = 2,4$  мм<sup>2</sup>);

$\lambda_{кк} = 0,0045 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.14 для эвтектики);

$\alpha_c = 1,2$  (рис. П.5.3 для  $S = 30^2 \cdot 3 \cdot 2$  мкм<sup>2</sup> =  $5,4 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>);

$\lambda_{с1} = 0,003 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.15 для соединения Au – Al на кристалле);

$\lambda_{с2} = 0,0015 \cdot 10^{-7}$  (табл. П.5.15 для соединения Au – Al на траверсах);

$\lambda_{кэ} = 10^{-7} \cdot (0,04 + 1,27 \cdot 0,004 - 5 + 5 \cdot 1,2(0,003 + 0,0015)) =$   
 $= 10^{-7} \cdot (0,04 + 0,0057 + 6 \cdot 0,0045) = 10^{-7} \cdot (0,04 + 0,0057 + 0,027) =$   
 $= 10^{-7} \cdot 0,073 = 7,3 \cdot 10^{-9}$  (1/ч).

**Этап 2.** Рассчитаем интенсивность отказов элементов кристалла  $\lambda_{эк}$  по формуле (П.5.4) при нормальных условиях.

Исходные данные найдем в соответствующих таблицах:

$\beta = 1$  (для биполярных транзисторов);

$T_{пер} = 25 + 150 \cdot 0,20 = 25 + 30 = 55$  °C;

$\alpha_i = 0,34$  (табл. П.5.16 для  $T = 55$  °C и  $K_H = 0,7$ );

$\lambda_T = 2,5 \cdot 10^{-10}$  1/ч (табл. П.5.17 для р-п-р-транзистора с изоляцией р-п-переходом III степени интеграции);

$\lambda_{п} = 0,0045 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.18 для электрического перехода, изготовленного

по биполярной технологии с изоляцией р-п-переходом);

$$\begin{aligned}\lambda_{ЭК} &= 1 \cdot 0,34 \cdot (2,5 \cdot 10^{-10} \cdot 144 + 0,0045 \cdot 10^7 - 33) = \\ &= 0,34 \cdot 10^{-7} \cdot (0,36 + 0,15) = 0,34 \cdot 0,51 \cdot 10^{-7} = \\ &= 0,17 \cdot 10^{-7} \cdot (1/\text{ч}) = \\ &= 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

**Этап 3.** Рассчитаем интенсивность отказов межэлементных соединений  $\lambda_{МС}$  по формуле (П.5.5).

Исходные данные найдем в соответствующих таблицах и рисунках:

$\lambda_{М1} = 0,02 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.19 для дорожки шириной 20 мкм);

$\lambda_{М2} = 0,04 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.19 для дорожки шириной 8 мкм);

Для нахождения значения  $\gamma_1(\alpha_1)$  определим фактическую плотность тока для различных цепей по формуле:

$$\rho_i = \frac{I_i}{S_i},$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения металлизации.

Для первой цепи питания получим:

$$S_1 = 1,2 \cdot 20 = 24 \text{ (мкм}^2\text{)};$$

$$\rho_1 = \frac{0,012 \text{ А}}{24 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2} = 5 \cdot 10^4 \text{ (А/см}^2\text{)}.$$

Для других цепей:

$$S_2 = 1,2 \cdot 8 = 9,6 \text{ (мкм}^2\text{)};$$

$$\rho_2 = \frac{0,013 \text{ А}}{9,6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2} = 13,54 \cdot 10^4 \text{ (А/см}^2\text{)};$$

$$S_3 = 1,2 \cdot 8 = 9,6 \text{ (мкм}^2\text{)};$$

$$\rho_3 = \frac{0,001 \text{ А}}{9,6 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ (А/см}^2\text{)}.$$

Тогда

$$Q_1 = \frac{5 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^5} = 0,25; \quad Q_2 = \frac{13,54 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^5} =$$

0,68;

$$Q_3 = \frac{1,04 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^5} = 0,5.$$

По рис. П.5.5 определяем значения  $\gamma_1$  для температуры 55 °С:

$$\gamma_1 = 2; \gamma_2 = 5; \gamma_3 = 4.$$

$$\begin{aligned} \lambda_{MC} &= 10^{-7} \cdot (0,02 \cdot 0,1 \cdot 2 + 0,04 \cdot 0,4 \cdot 5 + \\ &0,04 \cdot 0,4 \cdot 4) = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,004 + 0,08 + 0,064) = 0,148 \cdot 10^{-7} \\ &= 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}. \end{aligned}$$

**Этап 4.** Найдем полную расчетную интенсивность ИС типа КР1054ГП1 по формуле П.5.2 при нормальной температуре.

Выберем  $K_{\Pi} = 4,0$  (табл. П.5.12 для IV группы вида приемки);

$\lambda_{\text{ПР}} = 0,006 \cdot 10^{-7}$  1/ч (по табл. П.5.20 для III степени интеграции);

$$\begin{aligned} \lambda_{25} &= 4 \cdot (7,3 \cdot 10^{-9} + 1,7 \cdot 10^{-8} + 1,5 \cdot 10^{-8} + \\ &0,006 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 4 \cdot (0,73 + 1,7 + 1,5 + 0,06) \cdot 10^{-8} = 4 \cdot 4,0 \cdot 10^{-8} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч)}. \end{aligned}$$

**Этап 5.** Так как температура окружающей среды, при которой работает ИС, равна 35 °С, найдем коэффициенты ускорения (по рис. П.5.6 с учетом табл. П.5.21):

для корпуса:  $T = 40$  °С;  $E_a = 0,5$  эВ;  
 $K_{\text{ук}} = 2$ ;

для кристалла:  $T = 65$  °С;  $E_a = 0,3$  эВ;  
 $K_{\text{укр}} = 4$ ;

для соединений типа Au – Al:  $T = 65$  °С;  $E_a = 0,65$  эВ;  $K_{\text{yc1}} = 12$ ;

для соединений типа Au – Au:  $T = 65$  °С;  $E_a = 0,4$  эВ;  $K_{\text{yc2}} = 6$ ;

для прочих элементов кристалла:  $T = 65$  °С;  $E_a = 0,6$  эВ;  $K_{\text{упр}} = 10$ .

**Этап 6.** Рассчитаем интенсивность отказов конструктивных элементов  $\lambda_{КЭ}$  с учетом коэффициентов ускорения:

$$\begin{aligned}\lambda_{КЭ35} &= 10^{-7} \cdot [0,04 \cdot 2 + 0,0057 \cdot 4 + \\ &6 \cdot (0,003 \cdot 12 + 0,0015 \cdot 6)] = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,08 + 0,023 + 6 \cdot 0,0369) = 10^{-7} \cdot 0,32 = \\ &3,2 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

**Этап 7.** Рассчитаем интенсивность отказов межэлементных соединений  $\lambda_{МС}$  по формуле (П.5.5) для температуры 65 °С. Коэффициенты  $\gamma$  будут иметь следующие значения:  $\gamma_1 = 3,5$ ;  $\gamma_2 = 9$ ;  $\gamma_3 = 7$ .

$$\begin{aligned}\lambda_{МС35} &= 10^{-7} \cdot (0,02 \cdot 0,1 \cdot 3,5 + 0,04 \cdot 0,4 \cdot 9 + \\ &0,04 \cdot 0,4 \cdot 7) = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,007 + 0,144 + 0,112) = 0,263 \cdot 10^{-7} = \\ &2,6 \cdot 10^{-8} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

**Этап 8.** Вычислим интенсивность отказов указанных ИС при температуре +35 °С:

$$\lambda_{35} = 4 \cdot (3,2 \cdot 10^{-8} + 1,7 \cdot 10^{-8} + 2,6 \cdot 10^{-8} + 0,006 \cdot 10 \cdot 10^{-7}) =$$

$$= 4 \cdot (3,2 + 1,7 + 2,6 + 0,6) \cdot 10^{-8} = 4 \cdot 8,1 \cdot 10^{-8} = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч)},$$

что в 3 раза лучше значения  $\lambda$ , указанного в ТУ.

**Этап 9.** Для сравнения вычислим  $\lambda$  при максимально допустимой по ТУ температуре окружающей среды +70 °С.

Тогда коэффициенты ускорения по рис. П.5.6 с учетом табл. П.5.21 будут следующими:

для корпуса:  $T = 75$  °С,  $E_a = 0,5$  эВ,  $K_{ук} = 18$ ;

для кристалла:  $T = 100$  °С,  $E_a = 0,3$  эВ,  $K_{укр} = 11$ ;

для соединений типа Au – Al:  $T = 100$  °С;  $E_a = 0,65$  эВ;  $K_{УС1} = 110$ ;

для соединений типа Au – Au:  $T = 100$  °С;  $E_a = 0,4$  эВ;  $K_{УС2} = 25$ ;

для прочих элементов кристалла:  $T = 100$  °С;  $E_a = 0,6$  эВ;  $K_{упр} = 100$ .

Коэффициенты  $\gamma$  по рис. П.5.5 для 100 °С будут следующими:

$$\gamma_1 = 25; \gamma_2 = 65; \gamma_3 = 50.$$

$$\lambda_{\text{КЭ}70} = 10^{-7} \cdot [0,04 \cdot 18 + 0,0057 \cdot 11 + 6 \cdot (0,003 \cdot 110 + 0,0015 \cdot 25)] = 10^{-7} \cdot (0,72 + 0,06 + 6 \cdot 0,367) = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч);}$$

$$\lambda_{\text{МС}70} = 10^{-7} \cdot (0,02 \cdot 0,1 \cdot 25 + 0,04 \cdot 0,4 \cdot 65 + 0,04 \cdot 0,4 \cdot 50) = 10^{-7} \cdot (0,05 + 1,04 + 0,8) = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч);}$$

$$\lambda_{70} = 4 \cdot (3 \cdot 10^{-7} + 1,7 \cdot 10^{-8} + 1,9 \cdot 10^{-7} + 0,006 \cdot 100 \cdot 10^{-7}) = 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-7} = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч), что практически соответствует значению } \lambda, \text{ указанному в ТУ (} 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч).}$$

### Расчет интенсивности ИС типа КР1830BE51

**Этап 1.** Рассчитаем интенсивность отказов конструктивных элементов,  $\lambda_{\text{КЭ}}$  по формуле (П.5.3).

Исходные данные выберем из соответствующих таблиц и рисунков:

$\lambda_{\text{К}} = 0,2 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.13 для корпуса 2123.40-6 в пластмассовом варианте);

$\alpha_{\text{КР}} = 3,0$  (рис. П.5.2 для  $S = 44,2$  мм<sup>2</sup>);

$\lambda_{\text{КК}} = 0,01 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.14 для приклеивания);

$\alpha_{\text{С}} = 1,2$  (рис. П.5.3 для  $S = 5,4 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>);

$\lambda_{\text{С1}} = 0,03 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.15 для соединения Au –Al на кристалле);

$\lambda_{\text{С2}} = 0,004 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.15 для соединения Au –Ni на траверсах);

$\lambda_{\text{КЭ}} = 10^{-7} \cdot [0,2 + 3,0 \cdot 0,01 + 40 \cdot 1,2 \cdot (0,003 + 0,004)] = 10 \cdot (0,2 + 0,03 + 0,336) = 0,566 \cdot 10^{-7} = 5,7 \cdot 10^{-8}$  (1/ч).

**Этап 2.** Рассчитаем интенсивность отказов элементов кристалла  $\lambda_{\text{ЭК}}$  по формуле (П.5.4).

Исходные данные выберем из соответствующих таблиц и рисунков:

$\beta = 1,7$  (рис. П.5.4. для толщины подзатворного окисла 425 А).

$$T_{\text{пер}} = 25 + 130 \cdot 0,1 = 38 \text{ }^\circ\text{C};$$

$\alpha = 0,22$  (табл. П.5.16. для  $T_{\text{пер}} = 38$  °С и  $K_{\text{П}} = 0,7$ );

$\lambda_{\text{T}} = 3 \cdot 10^{-12}$  1/ч (табл. П.5.17 для полевых транзисторов V степени интеграции);

$\lambda_{\text{П}} = 10^{-12}$  1/ч (табл. П.5.18 для электрического перехода на МДП – структурах).

$$\lambda_{\text{ЭК}} = 0,22 \cdot 1,7 \cdot (72960 \cdot 3 \cdot 10^{-12} + 40 \cdot 10^{-12}) = 0,22 \cdot 1,7 \cdot 10^{-12} \cdot 218920 = 8,2 \cdot 10^{-8}. \text{ (1/ч)}.$$

**Этап 3.** Рассчитаем интенсивность отказов межэлементных соединений  $\lambda_{\text{МС}}$  по формуле П.5.5.

Исходные данные найдем в соответствующих таблицах и рисунках:

$\lambda_{\text{М1}} = 0,02 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.19 для дорожки шириной 30 мкм);

$\lambda_{\text{М2}} = 0,008 \cdot 10^{-7}$  1/ч (табл. П.5.19 для дорожки шириной 5 мкм);

$$1 = 2.$$

Для цепей питания

$$\rho_1 = \frac{0,0024}{1,2 \cdot 30 \cdot 10^{-8}} = \frac{0,024}{36 \cdot 10^{-8}} = 6,6 \cdot 10^4 \text{ (А/см}^2\text{)}.$$

$$\text{Для других цепей } \rho_2 = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 5 \cdot 10^{-8}} = 833 \text{ (А/см}^2\text{)}.$$

$$\text{Тогда } Q_1 = \frac{6,6 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^5} = 0,33; \quad Q_2 = \frac{833}{2 \cdot 10^5} = 4,2 \cdot 10^{-3}.$$

По рис. П.5.5 для температуры 38 °С определим значения:  $\gamma_1 = 1,0$ ;  $\gamma_2 = 0,004$ ;

$$\lambda_{\text{МС}} = 10^7 \cdot (0,02 \cdot 1,5 \cdot 1,0 + 0,008 \cdot 11,6 \cdot 0,004) = 10^7 \cdot (0,03 + 0,0004) = 0,03 \cdot 10^{-7}.$$

**Этап 4.** Найдем полную расчетную интенсивность отказов ИС типа

КР1830ВЕ51 по формуле (П.5.1) при нормальной температуре.

Выберем:

$\lambda_{\text{П}} = 4,0$  (табл. П.5.12 для VI группы вида приемки);

$\lambda_{\text{ПР}} = 0,02 \cdot 10^{-7}$  (табл. П.5.20 для V степени интеграции).

$$\begin{aligned} \lambda_{25} &= 4 \cdot (5,7 \cdot 10^{-8} + 8,2 \cdot 10^{-8} + 0,03 \cdot 10^{-7} + 0,02 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 4 \cdot 10^{-8} \cdot (5,7 + 8,2 + 0,3 + 0,2) = 4 \cdot 14,4 \cdot 10^{-8} = \\ &= 57,6 \cdot 10^{-8} = \\ &= 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.} \end{aligned}$$

**Этап 5.** Так как температура окружающей среды, при которой работает ИС, равна 35 °С, найдем коэффициенты ускорения по рис. П.5.6 и табл. П.5.21:

для корпуса:  $T = 35$  °С,  $E_a = 0,5$  эВ,  $K_{\text{УК}} = 2$ ;

для кристалла:  $T = 48$  °С,  $E_a = 0,6$  эВ,  $K_{\text{УКР}} = 5$ ;

для соединений типа Au – Al:  $T = 48$  °С;  $E_a = 0,65$  эВ;  $K_{\text{УС1}} = 6$ ;

для соединений типа Au – Ni:  $T = 48$  °С;  $E_a = 0,7$  эВ;  $K_{\text{УС2}} = 75$ ;

для прочих элементов:  $T = 48$  °С;  $E_a = 0,6$  эВ;  $K_{\text{УПР}} = 5$ .

По рис.П.5.5 определим значения  $\gamma_1$  для температуры 48 °С:

$$\gamma_1 = 2; \gamma_2 = 0,008.$$

**Этап 6.** Рассчитаем интенсивность отказов конструктивных элементов  $\lambda_{\text{КЭ}}$  с учетом коэффициентов ускорения и  $\lambda_{\text{МС}}$ :

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{КЭ35}} &= 10^{-7} \cdot [0,2 \cdot 2 + 0,03 \cdot 5 + 48 \cdot (0,003 \cdot 6 + 0,004 \cdot 7)] = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,4 + 0,15 + 2,2) = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч).} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{МС35}} &= 10^{-7} \cdot (0,02 \cdot 1,5 \cdot 2 + 0,008 \cdot 11,6 \cdot 0,008) = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,06 + 0,007) = 0,067 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч).} \end{aligned}$$

**Этап 7.** Вычислим интенсивность отказов указанных ИС при температуре +35 °С:

$$\begin{aligned} \lambda_{35} &= 4(2,8 \cdot 10^{-7} + 8,2 \cdot 10^{-8} + 0,67 \cdot 10^{-8} + \\ &0,02 \cdot 5 \cdot 10^{-7}) = \\ &= 4 \cdot 10^{-7} \cdot (2,8 + 0,82 + 0,67 + 0,1) = 4 \cdot 3,8 \cdot 10^{-7} = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-7} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ (1/ч)}, \text{ что практически} \\ &\text{соответствует значению } \lambda \text{ в ТУ (} 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч)}. \end{aligned}$$

**Этап 8.** Вычислим  $\lambda$  при температуре максимально допустимой окружающей среды +70 °С.

Коэффициенты ускорения по рис. П.5.6 с учетом табл. П.5.21 будут следующими:

для корпуса:  $T = 70 \text{ °С}$ ,  $E_a = 0,5 \text{ эВ}$ ,  $K_{ук} = 13$ ;

для кристалла:  $T = 83 \text{ °С}$ ,  $E_a = 0,6 \text{ эВ}$ ,  $K_{укр} = 47$ ;

для соединений типа Au – Al:  $T = 83 \text{ °С}$ ;  $E_a = 0,65 \text{ эВ}$ ;  $K_{усл1} = 60$ ;

для соединений типа Au – Ni:  $T = 83 \text{ °С}$ ;  $E_a = 0,7 \text{ эВ}$ ;  $K_{усл2} = 85$ ;

для прочих элементов:  $T = 83 \text{ °С}$ ;  $E_a = 0,6 \text{ эВ}$ ;  $K_{упр} = 47$ .

По рис. П.5.5 определим значение  $\gamma_1$  для температуры 83 °С:

$$\gamma_1 = 14; \gamma_2 = 0,04.$$

$$\begin{aligned} \lambda_{кэ70} &= 10^{-7} \cdot [0,2 \cdot 13 + 0,03 \cdot 47 + \\ &48 \cdot (0,003 \cdot 60 + 0,004 \cdot 85)] = \\ &= 10^{-7} \cdot [1,3 + 1,4 + 48 \cdot (0,18 + 0,34)] = \\ &= 27,67 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_{мс70} &= 10^{-7} \cdot (0,02 \cdot 1,5 \cdot 1,4 + \\ &0,0088 \cdot 11,6 \cdot 0,004) = \\ &= 10^{-7} \cdot (0,08 + 0,04) = 0,12 \cdot 10^{-7} \text{ (1/ч)}; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}\lambda_{70} &= 4 \cdot (27,67 + 0,082 + 0,12 + \\ &0,02 \cdot 5) \cdot 10^{-7} = \\ &= 4 \cdot 27,97 \cdot 10^{-7} = 112 \cdot 10^{-7} = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ (1/ч)}.\end{aligned}$$

Таким образом, расчетное значение  $\lambda$  для ИС типа КР1830ВЕ51 при работе при предельно допустимой температуре и коэффициенте нагрузки 0,7 равно  $1,1 \cdot 10^{-5}$  1/ч, что на порядок хуже указанного в ТУ значения.

#### **5.4. Указания по использованию номограммы (рис. П.5.6) для расчета коэффициента ускорения, продолжительности и температуры испытаний**

1. Определение *коэффициента ускорения* для различных температур перехода проводят в следующем порядке.

На оси абсцисс (Т) отмечают точку, соответствующую температуре перехода в форсированном режиме; из этой точки проводят прямую линию, параллельную приведенной на графике для установленной энергии активации ( $E_a$ ); в точке пересечения этой прямой с линией, соответствующей нормальному режиму, по оси ординат определяют значение коэффициента ускорения ( $K_y$ ).

2. Определение *температуры перехода в форсированном режиме* для заданного коэффициента ускорения проводят в следующем порядке.

Находят точку, соответствующую заданному  $K_y$  и нормальной температуре через эту точку проводят прямую линию, параллельную приведенной на графике для установленной энергии активации; в точке пересечения этой линии с осью абсцисс определяют искомое значение температуры перехода в форсированном режиме.

3. Определение *продолжительности испытаний в форсированном режиме* проводят в следующем порядке. Находят точку, соответствующую значению длительности испытаний в нормальном режиме (по оси ординат) и температуре (по оси абсцисс); через эту точку проводят линию, параллельную приведенной на графике для установленной энергии активации; на этой прямой отмечают точку, соответствующую температуре перехода в форсированном режиме, и для этой точки определяют по оси ординат продолжительность испытаний в форсированном режиме.

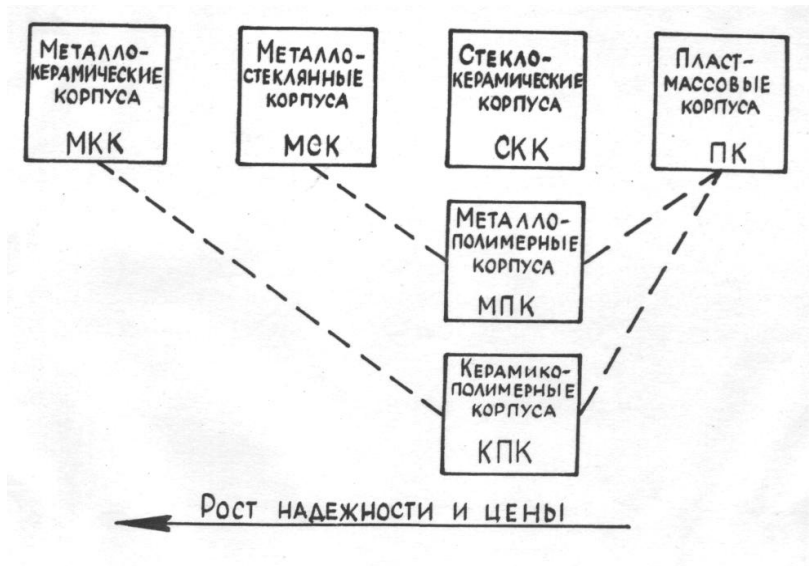


Рис. 4.4. Классификация корпусов по технологии изготовления и используемым материалам

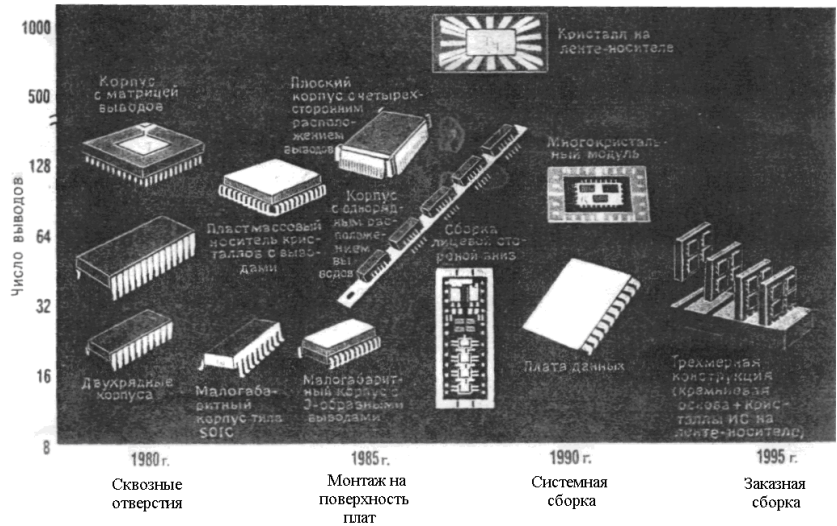


Рис. 4.8. Этапы развития корпусов

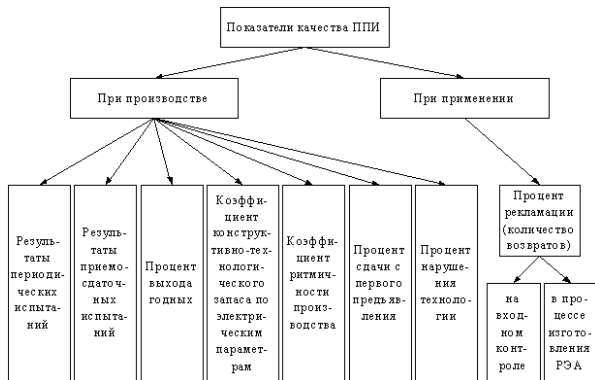
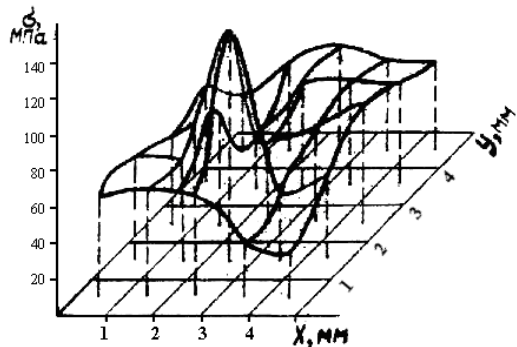
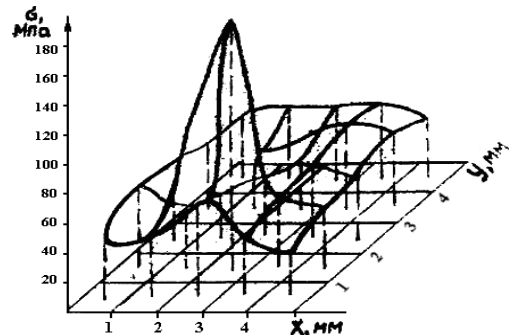


Рис. 1.1. Основные показатели, определяющие качество ППИ

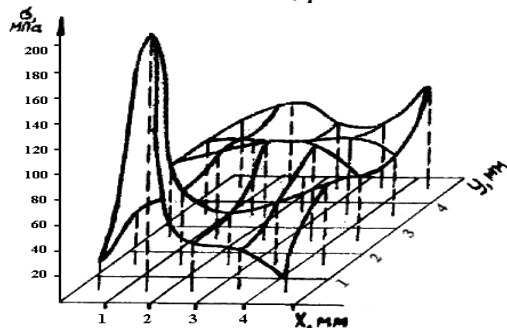
Рис. 1.1. Основные показатели, определяющие качество ППИ



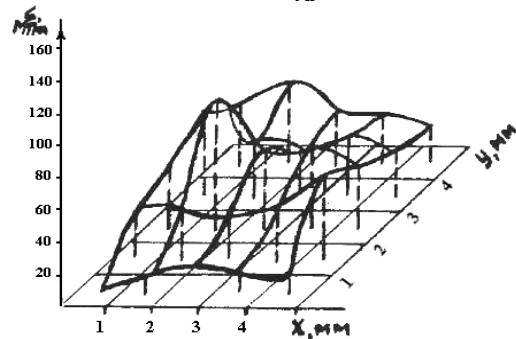
a)



б)



в)

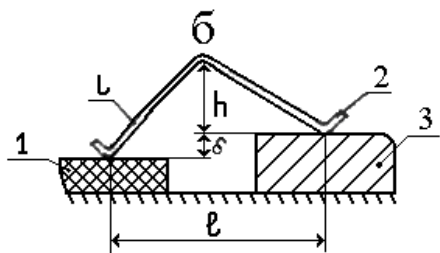
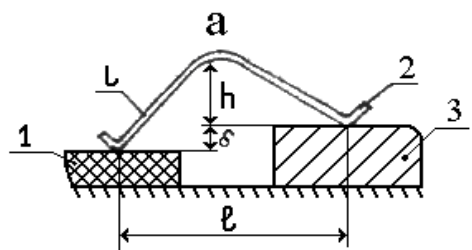


г)

Рис. 5.5. Поля напряжений. Пример поведения напряженного кристалла БИС при

разрушении от краевой пустоты в соединительном эвтектическом слое: а – после напайки;

б – после 10 термоциклов; в – после 100 термоциклов; г – после испытаний на удары





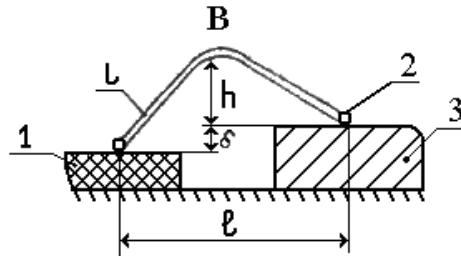


Рис. П.2.1. Форма внутренних выводов в зависимости от метода сварки:

а – ультразвуковая сварка (УЗС); б – ультразвуковая сварка с последующим вертикальным натяжением проводника (УЗСН); в – термокомпрессионная сварка (ТКС): 1 – кристалл, 2 – внутренний вывод; 3 – траверса корпуса

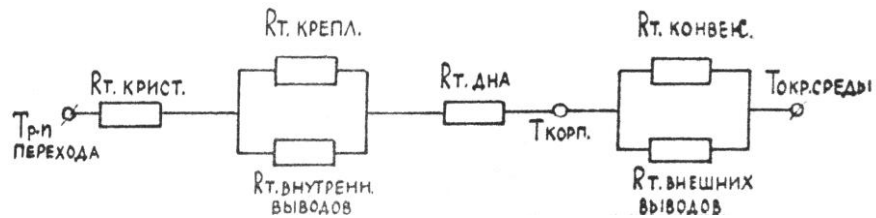
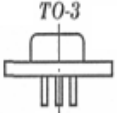
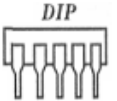
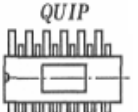
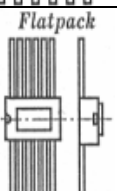


Рис. П.3.3. Тепловая схема замещения теплового сопротивления

Таблица 4.3

## Основные конструктивные типы корпусов ИС

Тип и условное изображение	Число выводов	Особенности конструкции	Технологический вариант изготовления
1	2	3	4
 <p>TO-3</p>	До 12	Выводы корпуса расположены по окружности, крышка – круглая	Металлостеклянный
 <p>DIP</p>	От 8 до 64	Жесткие выводы расположены в два ряда с шагом 2,54 мм	Керамический, стекло-керамический, пластмассовый
 <p>QIP</p>	До 64	Выводы (после формовки) расположены в четыре ряда в шахматном порядке	Керамический, стекло-керамический, пластмассовый
 <p>Flatpack</p>	От 6 до 80-100	Гибкие выводы расположены с двух или четырех сторон корпуса параллельно основанию с шагом 1,27 мм	Керамический, стекло-керамический, металлостеклянный, пластмассовый

ОКОНЧАНИЕ ТАБЛ. 4.3


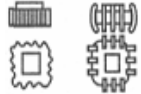

1	2	3	4
<p>SO</p> 	<p>От 8 до 64</p>	<p>Укороченные отформованные выводы расположены с 2-х сторон корпуса с шагом 1,27 мм</p>	<p>Пластмассовый, стекло-керамический</p>
<p>PLCC, LCCC</p> 	<p>От 16 до 156 (256)</p>	<p>Контакты (короткие выводы) расположены с четырех сторон квадратного корпуса с шагом 1,27 мм (0,635 мм)</p>	<p>Керамический, стекло-керамический, пластмассовый</p>
<p>PGA</p> 	<p>До 324 и более</p>	<p>Выводы (контакты) расположены по основанию в узлах координатной сетки с шагом 2,54 или 1,27 мм</p>	<p>Керамический, металлостеклянный</p>

Таблица 2.3

Вид испытания ИС	Испытания на стадии			Выборка, шт
	ОКР	установочной серии	периодических испытаний	
Оценка тепловых характеристик	+	+	+	5
Воздействие теплового удара	+	+		10
Воздействия изменения температуры среды	+	+		10
Воздействие одиночных ударов	+	+	+	10
Определение резонансных частот конструкции	+			5
Воздействие повышенной температуры среды	+			10
Воздействие ступенчатой электрической нагрузки при повышенной рабочей температуре среды	+	+	+	10
Определение и подтверждение предельных электрических режимов эксплуатации	+	+	+	10
Определение точки росы	+			5

ТАБЛИЦА 4.4

Значение основных параметров керамических материалов, используемых для производства корпусов и подложек ИС

Параметр	Усредненные значения параметров для керамики из					
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (90 – 96%)	BeO	AlN	SiC	BN	стеклоке- рамики
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	3,9	2,9	3,3	3,1	2,3	3
Коэффициент теплового расширения в диапазоне температур 293 – 673 К, 10 <sup>-6</sup> /К	6,7 – 7,3	7,2 – 8,0	4,3 – 4,5	4,2	1,2	3,0 – 4,2
Прочность на изгиб, МПа	300	230 – 250	350 – 500	450	-	150
Теплопроводность, Вт/м.К	20	240 – 260	100 – 230	67 – 270	55	5
Объемное сопротивление, Ом.см, не менее	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>12</sup> – 10 <sup>13</sup>
Диэлектрическая постоянная (частота 1 МГц)	8,5 – 9,7	6,5 – 7,0	8,8 – 8,9	40,0	4,2	3,9 – 7,8

ТАБЛИЦА 7.9  
Примеры схемы защиты МОП БИС от ЭСР

Номер схемы	Структура	Схема защиты	Площадь, мкм <sup>2</sup>	Напряжение повреждения, В
1	2	3	4	5
1	Горизонтальная структура с тонким подзатворным оксидом		8129	1100
2	Горизонтальная структура с тонким подзатворным оксидом и ограничительным сопротивлением		9999	2300
3	Горизонтальная структура с толстым подзатворным оксидом		8129	5500

Окончание табл. 7.9

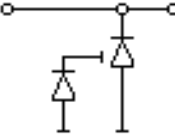
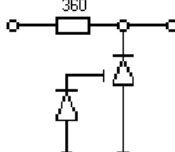
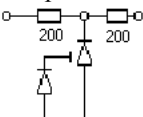
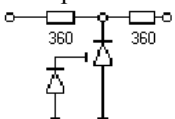
1	2	3	4	5
4	Диод с плавающим затвором		3870	800
5	Диод с плавающим затвором и ограничительным сопротивлением		6451	1400
6	Диод с плавающим затвором и двумя резисторами	<p>Вариант 1</p> 	6645	2400
7		<p>Вариант 2</p> 	8457	3400

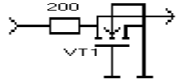
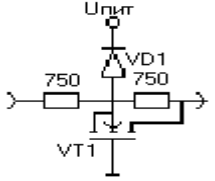
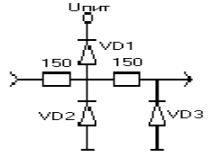
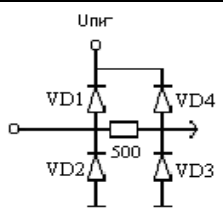


Таблица 7.10

## Основные защитные схемы отечественных серийных МДП ИС

Номер схемы	Схемы защиты	Техно- логия	Опас- ный потен- циал ЭС В	Пло- щадь ячейки, мкм <sup>2</sup>	Тип ИС	Приме- чание
1	2	3	4	5	6	7
1		КМОП	3000	3000 – 10000	КР1054РР1 КР537РУЗА КА835РЕ1	Одновременно защищает все входы
2		КМОП р-МОП	1000	2000	К561СА1 К561ЛД9 К561ЛР8 К573РФ6	

Продолжение табл. 7.10

1	2	3	4	5	6	7
3		КМОП	2000	2000	К1868ВЕ1 КР1043ВГ1	Одновременно защищает все входы
4		КМОП	3000	10000	М1623РТ1 М1623РТ2	
5		КМОП	1500	10000	156ИП7 1564ИР8 1564ТМ5 КА1835РЕ1 1564ИВ3	Одновременно защищает все входы и выходы
6		КМОП	5000	24400	К1554 К564ИР16 К176ИР2 К1561ГГ1 К1526ИР2	Одновременно защищает все входы

Окончание табл. 7.10

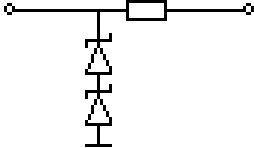
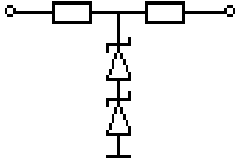
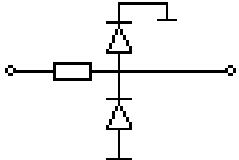
1	2	3	4	5	6	7
7		КМОП	3000	4590	К176* К561 К1561 К1526	Одновременно защищает все входы
8		КМОП	2500	4590	К561ЛН2 К561ИК1К15 К1526ЛН2 К1526ПУ6	
9		КМОП	2500	1060	М1826РЕ55 М1821РУ55	

Примечание:

\* – это обозначение относится к серии ИС, кроме типов схем, которые приведены в табл. 7.10.

Таблица 7.11

## Примеры схем защиты биполярных линейных ИС

Номер схемы	Структура	Площадь, мкм <sup>2</sup>	Напряжение повре- ждения, В
1	2	3	4
1		5160	3000
2		6900	3000
3		3680	3000

**Окончание табл. 7.11**

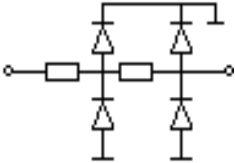
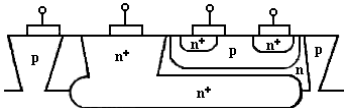
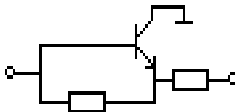
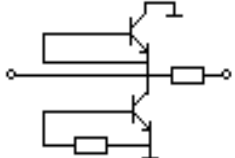
1	2	3	4
4		6450	5000
5		1260	9000
6		3870	3000
7		4190	5000

ТАБЛИЦА 8.1

Сравнение типичных факторов окружающей среды

Окружающая среда	АЭС		Ядерное оружие		Космос (полет длительностью 5 лет)
	Нормальная работа (40 лет)	Авария	Хранение (20-25 лет)	Использование	
Гамма-излучение Д $\gamma$ , рад Р $\gamma$ , рад/с	$10^3$ - $10^8$ $3 \cdot 10^{-7}$ - $3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^7$ $3 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^3$ $5 \cdot 10^{-6}$	$10^6$ $10^{13}$	
Нейтроны Ф $n$ , см $^{-2}$ Р $n$ , см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$	$10^9$ - $10^{14}$ $10^0$ - $10^5$			$10^{13}$ - $10^{14}$ $10^{15}$ - $10^{16}$	
Электроны (протоны), рад		$2 \cdot 10^8$			$10^5$ - $10^6$
Напряжение	Есть	Есть	Нет	Есть	Нет и есть

Примечания:

1. В системе СИ основная единица поглощения дозы 1 Грей (Гр) ( $1 \text{ Гр} = 10^2 \text{ рад}$ ).
2. В табл. 8.1 и далее по тексту приводится поглощенная доза излучения и мощность дозы по кремнию.
3. 1 рад (Si) есть количество излучения, выделяющего энергию 100 эрг в 1 г кремния.
4. Д $\gamma$  – доза  $\gamma$ -излучения, Р $\gamma$  – мощность дозы  $\gamma$ -излучения, Ф $n$  - поток нейтронов, Р $n$  – мощность потока нейтронов

ТАБЛИЦА.П.4.9

Зависимость параметров ИС типа К134ИР1 при испытаниях на долговечность

Параметр	Характеристики	Значение параметра для времени испытания × 1000 ч									
		0	1	2	4	6	8	10	12	14	15
U <sub>1Н</sub> , В	$\bar{x}$	2,6	2,6	2,6	2,53	5,58	2,6	2,6	2,6	2,58	2,58
	$\sigma$	0,01	0,0	0,0	0,03	0,07	0,35	0,02	0,02	0,04	0,06
I <sub>1Н</sub> , мА	$\bar{x}$	0,9	0,95	1,04	0,98	0,95	0,9	1,0	1,0	0,95	1,02
	$\sigma$	0,18	0,17	0,154	0,13	0,13	0,13	0,134	0,162	0,137	0,141

ТАБЛИЦА.П.4.10

Но- мер ИС	Значение параметра $U_{OL}$ , В, после испытаний в течение времени, ч									
	0	1000	3000	5000	7000	15000	25000	30000	40000	50000
1	0,19	0,18	0,25	0,22	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,26
2	0,15	0,12	0,2	0,17	0,18	0,16	0,16	0,15	0,2	0,14
3	0,13	0,12	0,19	0,22	0,16	0,16	0,15	0,14	0,2	0,11
4	0,13	0,12	0,18	0,18	0,2	0,14	0,18	0,14	0,19	0,15
5	0,17	0,16	0,22	0,2	0,22	0,18	0,25	0,18	0,13	0,21
6	0,23	0,14	0,25	0,17	0,25	0,25	0,24	0,24	0,14	0,16
7	0,22	0,21	0,28	0,25	0,15	0,2	0,24	0,23	0,24	0,18
8	0,13	0,12	0,18	0,19	0,26	0,15	0,15	0,13	0,17	0,2
9	0,19	0,22	0,29	0,25	0,19	0,2	0,2	0,17	0,23	0,14
10	0,16	0,15	0,22	0,19	0,16	0,18	0,18	0,16	0,14	0,15
11	0,25	0,12	0,19	0,16	0,18	0,15	0,14	0,15	0,14	0,15
12	0,13	0,08	0,15	0,07	0,18	0,11	0,11	0,11	0,11	0,26
13	0,13	0,24	0,31	0,27	0,3	0,27	0,25	0,25	0,19	0,22
14	0,25	0,24	0,31	0,27	0,28	0,27	0,26	0,23	0,18	0,21
15	0,09	0,09	0,17	0,14	0,2	0,13	0,13	0,14	0,21	0,25
16	0,13	0,12	0,19	0,16	0,24	0,15	0,19	0,13	0,14	0,18
17	0,20	0,19	0,26	0,22	0,15	0,22	0,2	0,15	0,15	0,22
18	0,19	0,18	0,25	0,22	0,17	0,21	0,2	0,19	0,19	0,22
19	0,21	0,20	0,27	0,23	0,24	0,23	0,23	0,24	0,24	0,15
20	0,2	0,19	0,26	0,22	0,24	0,22	0,22	0,14	0,14	0,24



Таблица П.5.4

Коэффициент уровня качества  $P_Q$ 

Уровень качества	КЛАСС ОТБРАКОВКИ В СООТВЕТСТВИИ С ТУ	$P_Q$
S	Требования к отбраковке: класс «S» стандарта MIL – M – 38510	1
B	Требования к отбраковке: класс «B» стандарта MIL – M – 3851	2
B-1	Электрические параметры по MIL – M – 38510. Требования к отбраковке по MIL - STD – 883, метод 5004, при аттестации по методу 50005, класс «B». Отклонения не допускаются	5
B-2	Электрические параметры, установленные поставщиком. Требования к отбраковке по MIL - STD – 883, метод 5004, класс «B». Допускаются некоторые отклонения от метода 5005, класс «B».	10
C	Требования к отбраковке: класс «C» стандарта MIL – M – 38510	16
C-1	Требования к отбраковке по MIL – STD – 883, метод 5004, класс «C». Соответствие по электропараметрам по MIL – M – 38510. Аттестация по MIL – STD – 883, метод 5005 класс «C». Отклонения не допускаются.	90
D	Коммерческие изделия (не соответствуют военным стандартам) в герметичном исполнении без проведения отбраковки, кроме обычного контроля изготовителя за качеством изделий.	150
D-1	Такие же приборы, но с герметизацией, выполненной с применением органических веществ (эпоксидные смолы, пластмассы и т.д.)	300

Таблица П.5.7

Коэффициент сложности для ИС малого и среднего уровня интеграции  $C_1$  и  $C_2$ 

Число вен- тилей	Отказы / $10^6$ ч		Число вен- тилей	Отказы / $10^6$ ч		Число вентилей	Отказы / $10^6$ ч	
	$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,0013	0,0039	30	0,013	0,013	60	0,021	0,017
2	0,0021	0,0050	32	0,013	0,013	62	0,021	0,017
4	0,0033	0,0064	34	0,014	0,014	64	0,022	0,017
6	0,0043	0,0074	36	0,015	0,014	66	0,022	0,018
8	0,0053	0,0082	38	0,015	0,014	68	0,022	0,018
10	0,0061	0,0089	40	0,016	0,015	70	0,023	0,018
12	0,0069	0,0095	42	0,016	0,015	72	0,023	0,018
14	0,0077	0,010	44	0,017	0,015	74	0,024	0,018

### Окончание табл. П.5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	0,0084	0,011	46	0,017	0,015	76	0,024	0,018
18	0.0091	0.011	48	0,018	0,016	78	0,025	0,019
20	0.0098	0.011	50	0,018	0,016	80	0,025	0,019
22	0,010	0,012	52	0,019	0,016	85	0,026	0,019
24	0,011	0,012	54	0,019	0,016	90	0,027	0,020
26	0,012	0,013	56	0,020	0,017	95	0,028	0,020
28	0,012	0,013	58	0,020	0,017	99	0,029	0,020

Примечание.  $P_p$  – коэффициент, учитывающий число выводов корпуса:

Число выводов корпуса	$P_p$
меньше 24	1,0
от 24 до 41	1,1
от 42 до 64	1,2
больше 64	1,3

Таблица П.5.8

Коэффициенты сложности для аналоговых ИС  $C_1$  и  $C_2$ 

Число тран- зисторов	Отказы / $10^6$		Число тран- зисторов	Отказы / $10^6$		Число тран- зисторов	Отказы / $10^6$	
	$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$
4	0,016	0,0056	64	0,013	0,025	148	0,025	0,040
8	0,0027	0,0081	68	0,014	0,026	156	0,026	0,041
12	0,0037	0,010	72	0,015	0,027	164	0,027	0,042
16	0,0046	0,012	76	0,015	0,028	172	0,028	0,043
20	0,0055	0,013	80	0,016	0,029	180	0,029	0,045
24	0,0063	0,015	84	0,016	0,029	184	0,030	0,046
28	0,0071	0,016	88	0,017	0,030	196	0,031	0,047
32	0,0079	0,017	92	0,018	0,031	204	0,032	0,048
36	0,0086	0,018	96	0,018	0,032	220	0,034	0,050
40	0,0093	0,020	100	0,019	0,032	236	0,036	0,051
44	0,010	0,021	108	0,020	0,034	252	0,038	0,052
48	0,011	0,022	116	0,021	0,035	268	0,040	0,053
52	0,011	0,023	124	0,022	0,036	284	0,042	0,054
56	0,012	0,024	132	0,023	0,038	300	0,043	0,055
60	0,013	0,024	140	0,024	0,039			

Таблица П.5.10

Коэффициенты сложности для ИС с высоким уровнем интеграции  $C_1$  и  $C_2$ 

Число вен- тилей	Отказы /10 <sup>6</sup> ч		Число вен- тилей	Отказы /10 <sup>6</sup> ч		Число вентилей	Отказы /10 <sup>6</sup> ч	
	$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$		$C_1$	$C_2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
100	0,029	0,020	950	0,13	0,046	4200	3,4	1,1
150	0,038	0,024	1000	0,14	0,046	4400	4 2	1,4
200	0,047	0,026	1200	0,17	0,057	4600	5,1	1,7
250	0,054	0,028	1400	0,21	0,069	4800	6,2	2 1
300	0.061	0,030	1600	0,25	0,085	5000	7,6	2,5
350	0,068	0,032	1800	0,31	0,10	5200	9,2	3,1
400	0,075	0,033	2000	0,38	0,13	5400	11,0	3,8
450	0,081	0,035	2200	0,46	0,15	5600	14,0	4.0
500	0,087	0,036	2400	0,56	0,19	5800	17,0	4,6

Окончание табл. П.5.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
550	0,092	0,037	2600	0,69	0,23	6000	21,0	5,6
600	0,098	0,039	2800	0,84	0,28	6200	25,0	8,4
650	0,10	0,040	3000	1,00	0,34	6400	31,0	10,0
700	0,11	0,041	3100	1,30	0,42	6600	37,0	13,0
750	0,11	0,042	3600	1,50	0,51	6800	46,0	15,0
800	0,12	0,043	3600	1,90	0,63	7000	56,0	19,0
850	0,12	0,044	3800	2,30	0,76			
900	0,13	0,045	4000	2,80	0,93			

Примечание.  $P_r$  – коэффициент, учитывающий число выводов корпуса:

Число выводов корпуса	$P_r$
меньше 26	1,0
от 26 до 64	1,1
больше 64	1,2

Таблица П.5.16

**Значения коэффициентов режима  $\alpha$  для элементов ИС**

Температура перехода, °С	Значения $\alpha$ при коэффициенте нагрузки $K_H$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
20	0,06	0,065	0,07	0,077	0,9	0,092	0,096	0,10	0,11
25	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
30	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,135	0,14	0,15	0,16
40	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,23	0,246	0,25	0,26
50	0,18	0,19	0,21	0,23	0,26	0,275	0,29	0,30	0,32
60	0,24	0,25	0,28	0,31	0,35	0,37	0,39	0,40	0,43
70	0,30	0,32	0,35	0,40	0,44	0,46	0,48	0,50	0,55
80	0,46	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,74	0,78	0,80
85	0,54	0,59	0,63	0,70	0,78	0,82	0,86	0,90	0,95
90	0,60	0,65	0,70	0,76	0,85	0,90	0,95	1,00	1,10
100	0,63	0,69	0,76	0,86	0,98	1,05	1,15	1,25	1,43
110	0,77	0,85	0,95	1,05	1,18	1,27	1,41	1,53	1,78
120	0,90	0,97	1,05	1,20	1,35	1,48	1,60	1,77	2,10
125	0,95	1,08	1,17	1,30	1,45	1,60	1,75	1,90	2,15
130	1,02	1,12	1,234	1,40	1,55	1,72	1,85	2,41	2,40
140	1,15	1,26	1,41	1,60	1,80	2,00	2,20	2,40	2,60
150	1,28	1,42	1,59	1,81	2,00	2,26	2,52	2,76	3,20

Таблица П.5.22

**Конструктивно-технологические данные для ИС типов КР1054ГП1 и КР1830ВЕ51**

Наименование КТД	Значение КТД для ИС	
	КР1054 ГП1	КР1830ВЕ51
1	2	3
<b>Тип корпуса</b>	2101.8-1	2123.40-2
Способ герметизации	Опрессовка пластмассой	
Способ крепления кристалла к основанию корпуса	Пайка	Приклеивание
Мощность рассеивания, мВт	150	130
Тепловое сопротивление переход – корпус, °С/мВт	0,20	0,10
Число элементов, составляющих ИС, в том числе транзисторов	177	73000
	144	72960
Количество вентиляей	60	2000
Биполярная или МДП-структура	биполярная	КМОП
Метод изоляции переходов	р-п-переход	----
Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>	2,4	44,2



Площадь активных элементов (транзисторов и диодов), мм <sup>2</sup>	1,1	17,7
Площадь металлизации, мм <sup>2</sup>	0,9	13,1
Толщина подзатворного оксида, Å	-----	425

Окончание табл. П.5.22

Число разнонагруженных участков металлизации	3	2
Ширина металлизированной дорожки цепей питания, мкм	20	30
Ширина металлизированной дорожки для остальных цепей, мкм	8	5
Толщина металлизации, мкм	1,2	1,2
Площадь разнонагруженных участков металлизации, мм <sup>2</sup> :		
первого	0,1	1,5
второго	0,4	11,6
третьего	0,4	-----
Ток потребления для цепей питания, А	0,012	0,024
Входной ток низкого уровня, А	0,013	50·10 <sup>-6</sup>
Материал проволоки для внутренних соединений	Золото	<b>Золото</b>
Диаметр проволоки, мкм	30	30
Количество сварок на кристалле	5	40
Количество сварок на траверсах	5	40
Метод сварки внутренних выводов	ТКС	ТКС

Количество ступеней диффузии Или ионных легирований	6 -----	----- 6
--	------------	------------

Примечание. ТКС – термокомпрессионная сварка.



Учебное издание

Горлов Митрофан Иванович  
Николаева Елена Петровна

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ  
НАДЕЖНОСТИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В авторской редакции

Компьютерная верстка О.А. Ивановой

Подписано к изданию 28.03.05.  
Уч.-изд. л. 10,8

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