



# Исследование факторов, влияющих на качество микросхем



**В.К. Дорошевич**

д.т.н.,  
первый заместитель  
генерального  
директора  
ЗАО «РТИ-Инвест»



**В.П. Марин**

д.т.н., профессор  
МГТУ МИРЭА,  
президент отделения  
«Качество и экология  
производства  
радиоэлектронной  
техники» Академии  
проблем качества



**П.В. Дорошевич**

нач. отдела развития  
системы менеджмента  
качества  
и стандартизации  
ОАО «Радиотехни-  
ческий институт  
имени академика  
А.Л. Минца» –  
(ОАО РТИ)

Определение возможности уменьшения планов контроля для функционально сложных микросхем

Любая микросхема, независимо от степени интеграции, содержит одни и те же конструктивно-технологические элементы, количество которых изменяется в зависимости от степени сложности микросхемы. Микросхема может быть представлена физико-статистической моделью нормирования сложности (рис. 1). Такая модель

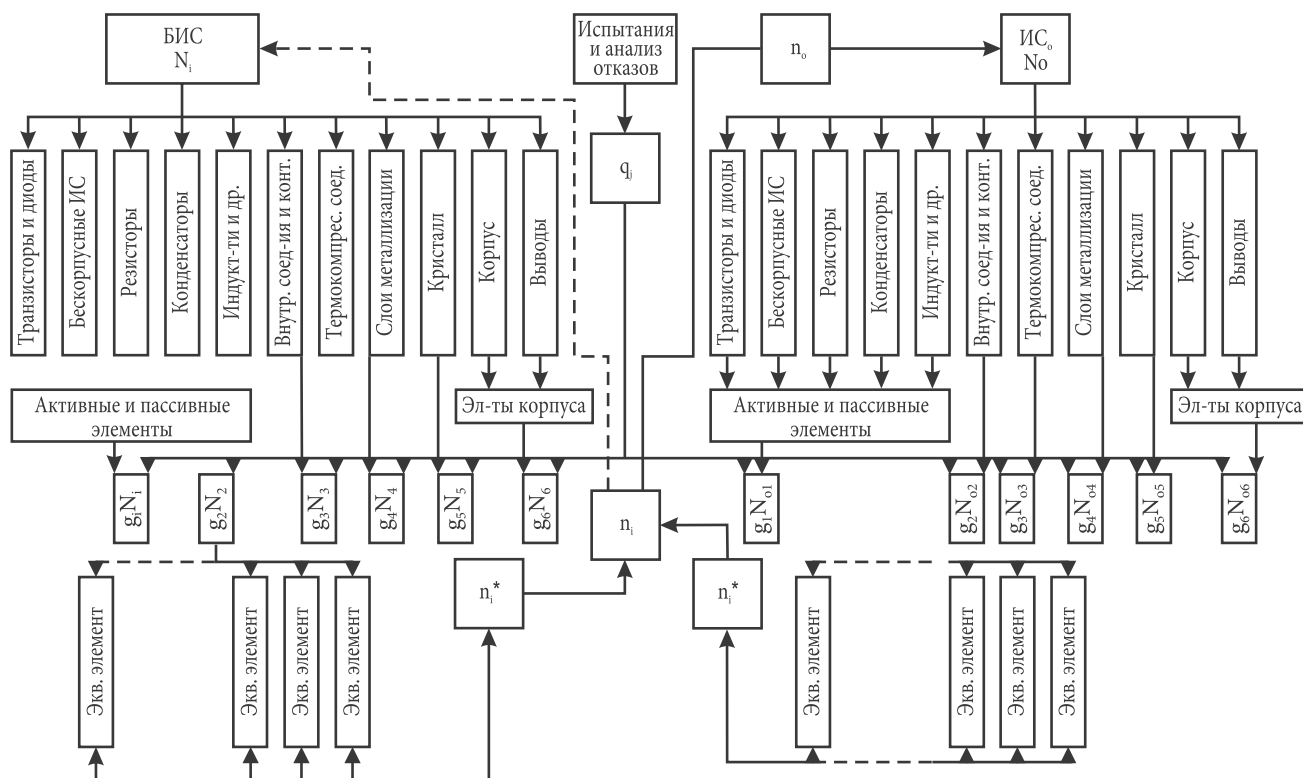


Рис. 1. Схема физико-статистической модели нормирования сложности микросхем

считается справедливой только для обоснования объемов выборок при испытаниях микросхем. Количество эквивалентных элементов строго связывается с количеством конструктивно-технологических элементов в микросхеме, а следовательно, и со степенью интеграции. Такая связь необходима для оценки качества микросхем, если предопределить, что один элемент модели заменяет собой совокупность единичных конструктивно-технологических элементов согласно равенству:

$$n_3^x = g_1 + g_2 + \dots + g_{m+1} = 1, \quad (1)$$

где  $n_3^x = 1$  – эквивалентный элемент;  $g_1, g_2 \dots g_m$  – удельные веса отказов или частота отказов конструктивно-технологических элементов.

Тогда общее число  $n_i^x$  эквивалентных однотипных элементов, нормированных по числу отказов, для  $i$ -ой микросхемы любой сложности будет определяться формулой

$$n_i^x = g_1 N_{i1} + g_2 N_{i2} + \dots + g_m N_{im}, \quad (2)$$

$$n_i^x = \sum_{j=1}^m g_j N_{ij},$$

где  $N_j(N_1, N_2 \dots N_m)$  – количество конструктивно-технологических элементов в  $j$ -ом направлении;  $n_i^x = \sum_{j=1}^m g_j N_{ij}$  – общее число конструктивно-технологических элементов в микросхеме.

Выражение для  $n_i^x$  позволяет получать среднее количество конструктивно-технологических элементов  $i$ -ой микросхемы, обуславливающих отказы и, благодаря нормированию по числу отказов, сравнивать друг с другом микросхемы различной степени интеграции для определения объема выборок при их испытаниях.

Действительно, если исходная микросхема, по которой накоплены данные по надежности, имеет  $n_0^x$  эквивалентных элементов, и для нее установлена выборка  $n_0$ , то исходная микросхема имеет  $n_0^x n_0$  эквивалентных элементов, отказы в работе которых приводят к отказам микросхемы.

Для микросхем с большей степенью интеграции должен подтверждаться не меньший уровень надежности, чем для исходной микросхемы. Это может быть обеспечено испытанием выборок и с общим количеством эквивалентных элементов не менее  $n_0^x n_0$ .

Таким образом, для одних и тех же условий и режимов испытаний можно записать:

$$n_i^x n_i = n_0^x n_0,$$

что позволяет определить объем выборки для  $i$ -ой микросхемы по формуле:

$$n_i = n_0 \frac{n_0^x}{n_i^x}, \quad (3)$$

или

$$n_i = n_0 \frac{\sum_{j=1}^m g_j N_{0j}}{\sum_{j=1}^m g_j N_{ij}}. \quad (4)$$

На основании данных формул проведены расчеты необходимого объема выборки в зависимости от степени интеграции.

Для микросхем сложностью более 1000 элементов объемы выборок определены путем экстраполяции и аппроксимации по объемам выборок для микросхем, полученных с помощью физико-статистической модели и нормирования сложности (рис. 1), так как удельные веса отказов микросхем со сложностью более 1000 элементов другие, чем у микросхем до 1000 элементов.

Указанные объемы выборок как по физико-статистической модели надежности, так и по физико-статистической модели нормирования сложности близки, с учетом уточнений они были включены в ОСТ В 11 0998 «Микросхемы интегральные. Общие технические условия» [1] для контроля качества микросхем.

### Исследование влияния качества материалов на качество микросхем

Качество микросхем (ИС) зависит от качества исходных материалов [2–7].

Наибольшее влияние на качество и надежность ИС оказывают:

- полупроводниковые материалы;
- фотолитография (фотолитография и фотошаблоны); корпуса для ИС;
- проволока микронного диаметра (присоединение внутренних выводов).

Отказы, обусловленные непосредственно полупроводниковым материалом, составляют порядка 6...8% от общего числа отказов, поэтому повышение качества полупроводникового материала представляет важную задачу.

В настоящее время основным видом полупроводникового материала (ПМ) для изготовления ИС являются слитки, пластины и эпитаксиальные структуры монокристаллического кремния.

Выпуск ИС, в особенности с большой площадью кристалла, в значительной степени определяется однородностью распределения величин



ны удельного электрического сопротивления по площади пластин, и, следовательно, по торцу слитка. Вводимый параметр, ограничивающий однородность распределения удельного сопротивления по торцу слитка и площади пластин, устанавливается с учетом технологических особенностей выращивания монокристаллов, характеризующихся определенной зависимостью распределения примеси по торцу слитка. Кроме того, необходимо учитывать требование уменьшения неоднородности, исходя из размеров активных областей ИС.

Допустимая величина предельного отклонения значения какого-либо параметра и, в частности, удельного электрического сопротивления по торцу слитка и площади пластин для данного типа ИС может быть определена из следующего соотношения:

$$\frac{d}{\Delta} \leq \frac{L}{A}, \quad (1)$$

где  $L$  – шаг неопределенности распределения примесей в исходной пластине;  $A$  – амплитуда неоднородности в исходной пластине;  $d$  – длина активной области прибора;  $\Delta$  – допустимая амплитуда неоднородности распределения примесей в приборе.

Изменение величины удельного сопротивления не должно превышать значения, определяемого из расчета физических структур ИС, с учетом технологических возможностей и особенностей производства, способа получения, типа легирующей примеси, размеров слитка и назначения материала для каждого из интервалов удельных сопротивлений. Требования со стороны ИС различного функционального назначения к значению времени жизни неосновных носителей заряда (в.ж.н.з.) противоречивы, а в ряде случаев однозначно не определяются. Так, например, для биполярных транзисторов диффузионная длина неосновных носителей должна быть больше толщины базы. Однако для уменьшения времени рассасывания при работе транзистора в импульсных схемах необходимо применять материал с малым временем жизни неосновных носителей, а следовательно, и с малой диффузионной длиной. Весьма информативным показателем качества материала является однородность распределения значения времени жизни неосновных носителей заряда по торцу слитка, площади пластин и эпитаксиальных структур.

Объясняется это тем, что в.ж.н.з. определяется скоростью их объемной рекомбинации. Для  $n$ - $p$ - $n$  транзисторов статический коэффициент усиления прямо пропорционален времени жизни дырок в эмиттере  $\tau_p$  и определяется выражением

$$B_{ст} = \frac{D_n(X'')}{1,7L_a L_d} \tau_p, \quad (2)$$

где  $D_n(X'')$  – коэффициент диффузии в области эмиттера;  $L_a, L_d$  – характеристическая длина в распределении акцепторов и доноров в базе транзистора, соответственно.

При этом величина  $\tau_p$  очень чувствительна к наличию в эмиттере концентраций таких примесей, как медь, золото, железо, а также дислокаций, являющихся центрами рекомбинаций для дырок. Для приборов с зарядовой связью (ПЗС) показано, что реализация ряда схемотехнических решений возможна только с применением кремния с большими (200 мкм) значениями времени жизни неосновных носителей заряда.

Стабильность параметров ИС во многом определяется содержанием кислорода в кремнии, попадание которого возможно вследствие взаимодействия расплава с тиглем.

Наличие углерода в монокристаллическом кремнии снижает радиационную стойкость ИС на его основе, а при концентрации выше  $10^{18}$  ат/см<sup>3</sup> он становится источником образования преципитатов карбида кремния, являющихся зародышами роста микродефектов.

Влияние других примесей – меди, железа – также проявляется, как правило, в образовании неоднородностей, причем образование областей с высокой скоростью рекомбинации и малым временем жизни происходит при проведении высокотемпературных технологических процессов.

Нормы на содержание вышеуказанных нелегирующихся примесей устанавливаются в технических условиях (ТУ) на конкретные марки кремния, при этом учитываются как технологические возможности уменьшения содержания этих примесей, так и влияние их на характеристики ИС.

Оценить влияние примесей, например меди, возможно после установления взаимосвязи концентрации меди в кремнии с таким информативным параметром, как контактная разность потенциалов. В результате локальных измерений контактной разности потенциалов установлена корреляция между работой выхода на поверхность кремния, дефектами и примесями в материале. Работа выхода по всей поверхности определяется суммой работ выхода отдельных участков:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n S_i \Phi_i, \quad (3)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -ой зоны;  $\Phi_i$  – средняя величина работы выхода  $i$ -ой зоны.

С помощью закона распределения контактной разности потенциалов экспериментально может быть учтено влияние электрически активных примесей в исходном кремнии на стабильность параметров ИС, а также воспроизводимость параметров ИС в производстве.

Характерной особенностью обработки пластин и эпитаксиальных структур является то, что в технологическом процессе изготовления ИС они являются объектами групповой обработки и группового применения. Механическая обработка, а в дальнейшем литография, диффузия и эпитаксия проводятся на группе пластин и структур, выбираемых из одной партии. Качество проведения технологических операций определяется однородностью параметров пластин и структур в партии и по площади. Отсюда возникает необходимость введения таких групповых показателей качества, как средние значения толщины и удельного сопротивления, отклонения значений удельного сопротивления и в.ж.н.з. от номинального, допустимое отклонение величины удельного сопротивления пластины от среднего значения в партии, однородность удельного сопротивления и в.ж.н.з. по площади пластин и структур.

Групповые характеристики и показатели качества, отражая степень однородности параметров пластин и структур по площади и в партии, позволяют определить и установить на этапе проектирования оптимальный для конкретной группы пластин технологический режим их обработки с точки зрения получения максимального выхода годных ИС.

На основании этого может быть решена и обратная задача – оценка качества и эффективности проектирования ИС. Критериями эффективности разработки и проектирования, а также качества выполнения отдельных технологических операций обработки исходных полупроводниковых материалов, в настоящей работе предложены:

- однородность распределения удельного сопротивления по площади пластин;
- однородность распределения в.ж.н.з. в слитках и пластинах монокристаллического кремния;
- удельное сопротивление и толщины эпитаксиальных слоев в кремниевых однослойных эпитаксиальных структурах (КОЭС);
- в.ж.н.з. в эпитаксиальных слоях КОЭС и однородность его распределения по площади КОЭС.

Для контроля качества материалов по предложенным критериям разработаны неразрушающие радиоволновые и оптические методы измерения удельного сопротивления и в.ж.н.з. в слитках, пластинах и эпитаксиальных слоях КОЭС. Методы

характеризуются высокой локальностью, низкой погрешностью измерений.

### Исследование влияния технологических операций на качество микросхем

На качество ИС существенное влияние оказывает качество обработки поверхности структуры, в частности тщательная промывка пластин. Неполное удаление травителя с поверхности кристалла в процессе изготовления ИС может привести к разрывам металлизированной разводки при попадании влаги внутрь корпуса готовой схемы [8–10].

Небрежность при резке и ломке пластин на кристаллы может вызвать появление коротких замыканий золотых проводников на исходный кремний на краю кристалла.

Отказы пленочных резисторов в большинстве своем определяются технологическими дефектами: механическими повреждениями резистивного слоя изагрязнением резистивных пленок. Наблюдающийся иногда дрейф сопротивлений тонкопленочных резисторов определяется окислением резистивного слоя из-за некачественного защитного покрытия.

При изготовлении ИС по совмещенной технологии резисторы получают методом напыления пленок из смеси двух или более металлических и керамических компонентов, например из смеси хрома с монооксидом кремния ( $Cr-SiO$ ). Соединение резисторов с другими элементами осуществляют с помощью металлизированных дорожек ( $Al$ ). Для предотвращения возможной химической реакции между элементами алюминий напыляют на слой химически нейтрального металла, предварительно нанесенного на поверхность резистора. При повреждении или слишком малой толщине разделительной пленки реакция между алюминием и материалом напыленного резистора может приводить к образованию интерметаллического соединения, обладающего диэлектрическими свойствами, что обуславливает разрыв электрической цепи.

Некачественные соединения являются одним из основных видов отказов ИС. Обрывы выводов наиболее часто происходят в результате пережима мягкого вывода вблизи контакта в процессе термокомпрессии, ведущего к сужению поперечного сечения проводника, перегреву и расплавлению его при большом токе.

При соединении металлизированных площадок, обычно алюминиевых, на структуре с внешними выводами корпуса ИС используют золотую проволоку, которую присоединяют к контактными



площадкам термокомпрессионной либо ультразвуковой сваркой. При термокомпрессионной сварке происходит взаимная диффузия золота и алюминия, приводящая к образованию на границе раздела золото–алюминий интерметаллических соединений типа  $Au_2Al$  (вблизи золотой проволоки) и  $AuAl_2$  (вблизи алюминиевой контактной площадки на поверхности окисла кремния).

Образование интерметаллических соединений и изменение их состава в процессе эксплуатации приводит к возникновению значительных механических напряжений на поверхности раздела золото–алюминий вследствие изменения объема и несовпадения кристаллических решеток различных интерметаллических соединений. Механические напряжения по периферии термокомпрессионного контакта золота с алюминием, а также различие температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) отдельных интерметаллических соединений усиливают возникающие напряжения, что может привести к отрывам золотых проводников от алюминиевых контактных площадок. Неправильная центровка термокомпрессионного контакта относительно контактной площадки может приводить к высокому электрическому сопротивлению интерметаллического соединения и обрыву электрической цепи. Если поверхность кристалла защищена пленкой двуокиси кремния, то возможно также образование интерметаллического соединения типа  $Al_xAu_ySi_z$  темно-красного или черного цвета в области термокомпрессионного соединения при наличии различных дефектов в окисной пленке (отверстия, проколы, недостаточная толщина слоя окисла и др.), через которые происходит взаимодействие кремния с алюминием и золотом.

При недостаточной температуре подложки, низком удельном давлении рабочего инструмента в зоне связи или недопустимо малой продолжительности сварки может произойти понижение механической прочности контакта и, как следствие, обрыв. К снижению механической прочности термокомпрессионных соединений приводят механические повреждения и подтравления контактных площадок в процессе фотолитографии, что уменьшает площадь контакта.

Попадание влаги внутрь корпуса до герметизации прибора или при недостаточной герметичности корпуса в процессе эксплуатации приводит к отказам ИС в связи с тем, что протекающая при этом химическая реакция приводит к образованию окиси алюминия. Это является причиной нарушения целостности электрической цепи вследствие высокого электрического сопротивления дефектных участков металлизированной разводки.

На основе данных взаимосвязи видов и причин отказов с технологическими операциями, параметрами элементов корпуса и кристалла можно методами физико-технической экспертизы оценивать качество готовых ИС.

## Литература

1. ОСТ В 11 0998-99 «Микросхемы интегральные. Общие технические условия». Изд-во Минобороны, 1999.
2. Справочник. Анализ отказов и контроль технологических операций производства интегральных микросхем. 22 ЦНИИИ МО, 1983.
3. Отчет о НИР «Исследование путей совершенствования системы обеспечения качества электрорадиоизделий военного назначения». 22 ЦНИИИ МО, 1987.
4. Отчет о НИР «Исследование путей совершенствования системы обеспечения и контроля качества электрорадиоизделий военного назначения», «Примыкание-1», Инв. 475, 22 ЦНИИИ МО, 1989.
5. Дорошевич В.К. «Влияние качества материалов на качество микросхем». Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». 25–28.10.2005 г., Москва.
6. Марин В.П., Савченко В.П., Федоров В.К., Луценко А.В. Технологии производства изделий электронной техники. Монография. /Под ред. В.П. Марина. М.: Радиотехника, 2015, 88 с.
7. Марин В.П., Савченко В.П., Федоров В.К., Луценко А.В. Основы технологии сборочного производства. Монография. /Под ред. В.П. Марина. М.: Радиотехника, 2015. 80 с.
8. Отчет о НИР «Исследование методов контроля и физико-технического анализа качества операций типовых технологических процессов изготовления схем с целью разработки мероприятий по дальнейшему повышению их качества». 22 ЦНИИИ МО, 1980.
9. Отчет о НИР «Разработка требований к системе контроля и обеспечения качества технологических процессов изготовления микросхем с целью повышения их надежности. Разработка требований к системе контроля процессов изготовления микросхем военного назначения с повышенной надежностью». 22 ЦНИИИ МО, 1980.
10. Дорошевич В.К. «Влияние технологических операций на качество микросхем». Материалы международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения». 25–28.10.2005 г., Москва.