

Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов

ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ

R. O. Mishanov, M. N. Piganov, V. P. Perevertov

THE CHOICE OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF INTEGRATED CIRCUIT SPECIAL PURPOSE FOR THE INDIVIDUAL FORECASTING OF QUALITY AND RELIABILITY

Аннотация. *Актуальность и цели.* Определение электрических параметров интегральных микросхем, изготовленных по КМОП-технологии, для проведения индивидуального прогнозирования (ИП) показателей качества и надежности является важной составляющей процесса прогнозирования надежности, так как от их выбора значительно зависит как корректность прогнозов, так и их точность. При этом выбор параметров должен быть обоснован в соответствии с результатами физико-химических методов исследования отказов ИМС, изготовленных по конкретной технологии. Также немаловажным является учет статистических данных отказов КМОП ИМС. *Материалы и методы.* Систематизация информации по видам, признакам, причинам, механизмам отказов, а также возможным дефектам структуры ИМС в совокупности со статистическими данными по отказам позволяет выявить контролируемые параметры КМОП ИМС, несущие информацию о потенциальной надежности изделий. Определение электрических параметров КМОП ИМС, имеющих тенденцию к раннему выходу за установленные пределы и несущих информацию о наиболее вероятных отказах для данной технологии изготовления, позволяет получить необходимую точность прогнозов. *Результаты.* Приведенная в работе информация предназначена для определения набора электрических параметров КМОП ИМС для проведения ИП в зависимости от предполагаемых дефектов структуры и механизмов отказов, протекающих в структуре ИМС. Также в работе рассматривается влияние поражающих факторов космического пространства, что актуально для КМОП ИМС специального назначения. *Выводы.* Изменениям некоторых электрических параметров ИМС соответствует широкий набор возможных причин, механизмов отказов и дефектов. Такие параметры целесообразно использовать в качестве исходных данных для проведения ИП.

Abstract. *Background.* Determination of the electrical parameters of integrated microcircuits manufactured by CMOS technology for individual forecasting (PI) of quality and reliability indicators is an important component of the reliability prediction process. From their choice, both the correctness of the forecasts and their accuracy depends significantly. In this case, the choice of parameters should be justified in accordance with the results of physicochemical methods for investigating failures of IMS produced by a specific technology. It is also important to take into account the statistical data of CMOS IMS failures. *Materials and methods.* The systematization of information by types, attributes, causes, failure mechanisms, as well as possible defects in the IC structure, together with statistical data on failures, allows to identify the monitored parameters of CMOS ICs bearing information on the potential reliability of products. The determination of the electrical parameters of CMOS ICs, which tend to early exit beyond the established limits and carry information about the most probable failures for the given manufacturing technology, allows obtaining the necessary accuracy of forecasts. *Results.* The information given in this work is intended to determine the set of electrical parameters of the CMOS IC for carrying out the IP, depending on the expected structural defects and failure mechanisms occurring in the IC structure. Also, the work considers the impact of the damaging factors of outer space, which is relevant for CMOS special purpose IC. *Conclusions.* Changes in some electrical parameters of the IC correspond to a wide range of possible causes, failure mechanisms and defects. Such parameters should be used as the initial data for conducting IP. It is established that the set of electrical parameters can significantly change if there are suspicions of specific defects in the manufacture of IC.

Установлено, что набор электрических параметров может значительно изменяться при подозрениях на конкретные дефекты при изготовлении ИМС.

Ключевые слова: надежность, качество, безопасность, отказ, КМОП-микросхема, индивидуальное прогнозирование, электрические параметры, механизм отказов, виды отказов, причины отказов, дефект.

Key words: reliability, quality, safety, failure, CMOS chip, individual forecasting, electrical parameters, failure mechanism, failure mode, failure reasons, defect.

Введение

Организация и проведение мероприятий по повышению надежности технических устройств, устанавливаемых на борт космических аппаратов (КА), являются важнейшим аспектом в ракетно-космической отрасли [1, 2]. Стоит отметить, что заложение свойств надежности необходимо проводить на ранних этапах жизненного цикла изделия: при проектировании и конструировании, а обеспечивать – при изготовлении устройств. Широкое применение в бортовой аппаратуре получили интегральные микросхемы (ИМС), выполненные по КМОП-технологии и способные выполнять сложные функции по передаче, приему, преобразованию и хранению информации с необходимым быстродействием и энергопотреблением при сравнительно малом занимаемом пространстве. КМОП ИМС представляют собой совокупность проводников, сформированных с помощью фотолитографии в диэлектрической среде конечного объема [3]. Таким образом, к ИМС предъявляются достаточно жесткие требования по качеству и надежности, особенно при работе в условиях космического пространства (КП).

Кроме того, качество и надежность аппаратуры и применяемой в ней электронной компонентной базы (ЭКБ) в решающей степени зависит от правильной постановки, организации, методики и технологии контроля, измерений, испытаний и, в целом, от уровня метрологического обеспечения производства [4]. Немаловажным является проведение анализа статистики отказов аппаратуры и ее составных частей с выявлением наиболее критических элементов. В случае серийного производства изделий анализ отказов преимущественно опирается на анализ отказов ранее выпущенных таких же изделий. При освоении нового производства либо при единичном производстве, что имеет место в ракетно-космической отрасли, анализ отказов основывается на изделиях-аналогах, что несколько искажает необходимую информацию. Кроме того, согласно модели эволюции состояния электронных изделий [5] получение исчерпывающей информации о надежности изделий затруднено за счет накапливающихся структурных изменений, которые впоследствии могут привести к внезапному отказу. Таким образом, получение достоверной информации о надежности бортовых изделий является важнейшей составляющей при проектировании новой аппаратуры.

Отказу любого устройства предшествует аномальное поведение какого-либо параметра, характеризующего надежность данного изделия. Определение таких параметров, имеющих тенденцию к раннему выходу за установленные технической документацией (ТД) пределы, на ранних этапах жизненного цикла изделия является достаточно сложной задачей. Стоит отметить, что оптимальным подходом к проблеме надежности ИМС является совместное использование физического метода исследования отказов и статистического метода получения интенсивности отказов [6].

Индивидуальное прогнозирование показателей качества и надежности с применением математических моделей относится к способам обеспечения приемлемого уровня безопасности и надежности с минимальными затратами времени и ресурсов [7–11]. Важнейшей составляющей такого подхода является определение прогнозируемых параметров, т.е. параметров, несущих в себе информацию о надежности изделия. Для корректного определения таких параметров КМОП ИМС необходимо выявить взаимосвязи между видами отказов, их признаками, причинами; рассмотреть механизмы, вызывающие отказы; выявить электрические параметры, информирующие о возможном отказе.

Целью работы является определение электрических параметров КМОП ИМС для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности ИМС.

Исследование отказов ИМС

На рис. 1 представлена структурная схема исследования отказов ИМС, основанная на работе [6].

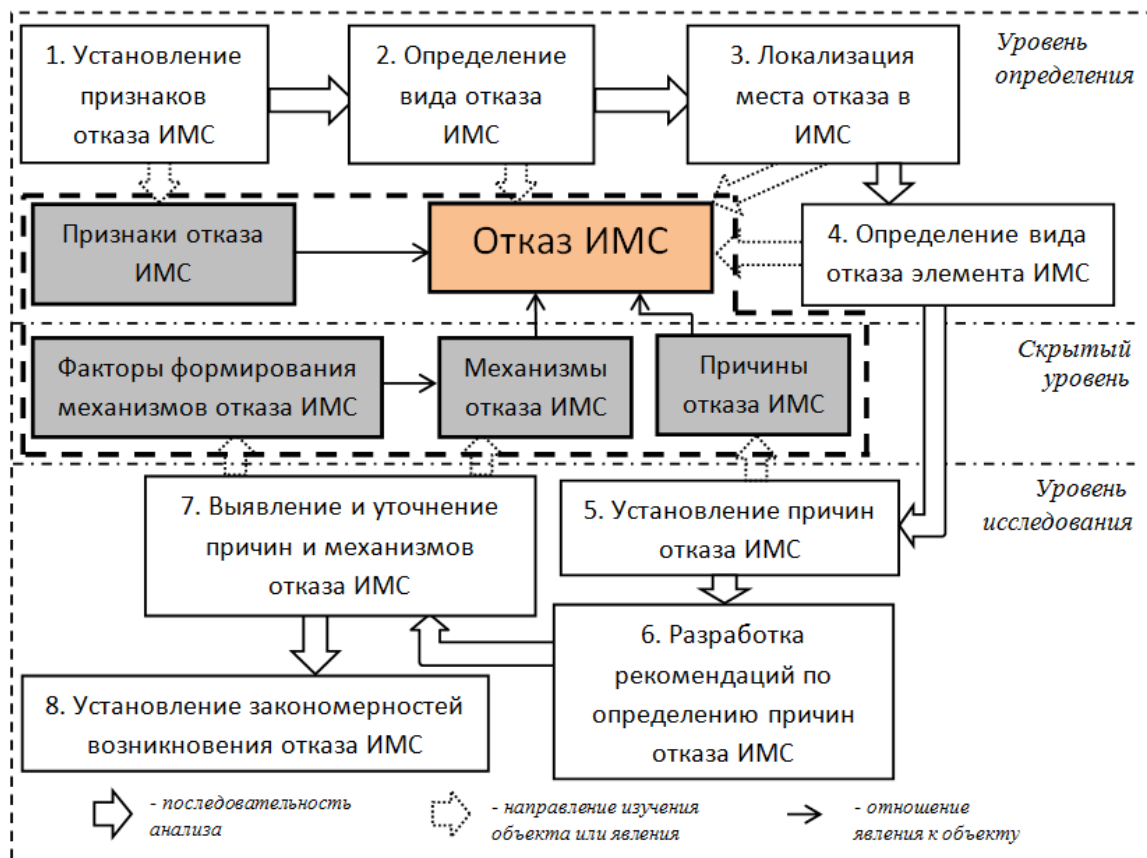


Рис. 1. Структурная схема исследования отказов ИМС

Согласно работе автора [6] исследование отказов проводится в два этапа: первичный и вторичный анализ отказов. В задачи первичного анализа входят:

- установление признаков отказа ИМС (установление различий параметров работоспособной и отказавшей ИМС);
- определение вида отказа ИМС;
- локализация места отказа;
- определение вида отказа элемента ИМС;
- установление причин отказа, т.е. событий, предшествовавших отказу;
- разработка рекомендаций по определению выявленных причин отказа.

Вторичный анализ отказов проявляется:

- в выявлении и уточнении причин и механизмов отказа ИМС;
- в установлении закономерностей их возникновения с помощью статистических, физических и физико-химических методов.

Виды отказов ИМС

В табл. 1 приведена классификация видов отказов ИМС, основанная на информации, приведенной в работах [12–14].

Таблица 1

Виды отказов КМОП ИМС

Признак деления 1	Вид отказа 2
Характер изменения параметра до момента возникновения отказа	Внезапный (катастрофический)
	Постепенный (деградационный)
Связь с другими отказами	Независимый
	Зависимый

Окончание табл. 1

1	2	
Возможность последующего использования изделия после возникновения отказа	Полный	
	Частичный	
Наличие внешних проявлений отказа	Очевидный (явный)	
	Скрытый (неявный)	
Характер устранения отказа	Устойчивый	
	Самоустраняющийся	Сбой
		Перебегающий
Причина возникновения отказа: при конструировании	Конструкционный (из-за нарушения норм конструирования)	
	Производственный (из-за нарушения норм технологического процесса изготовления)	
при изготовлении	Эксплуатационный (из-за нарушения условий эксплуатации)	
Природа (происхождение) отказа	Эксплуатационный (из-за нарушения условий эксплуатации)	
	Естественный	
По механизму возникновения	Искусственный	
	Связанные с явлениями в объеме кристалла	
	Обусловленные явлениями на поверхности кристаллической структуры	
	Зависящие от состояния внутренних контактных соединений	
	Связанные с конструктивным оформлением	
По механизму процесса, вызывающего отказ (вид энергии, вызывающей отказ)	Связанные с внешними воздействиями	
	Вызванные диффузионными процессами (механическая энергия)	
	Вызванные дефектами и дислокациями (тепловая энергия)	
	Вызванные флуктуационными разрывами межатомных связей (электрическая энергия)	
	Вызванные разрывом химических связей (химическая)	
	Вызванные радиационными эффектами (электромагнитная)	

В работе [3] отмечается, что в общем случае в КМОП-элементах возможны две разновидности отказов в зависимости от структурного изменения: разрыв проводника, сформированного в малом объеме элемента; пробой диэлектрической пленки элемента.

Признаки отказов КМОП ИМС

Согласно структурной схеме исследования отказов ИМС (см. рис. 1) обнаружить отказ можно только по проявлению его признака. Для установления признаков отказа важным является сопутствующая изделию документация, в которой указаны режимы работы (испытаний) и условия, при которых произошел отказ, сведения о типе ИМС, номере партии, паспорте на ИМС и др.

Контроль КМОП ИМС сопровождается измерением статических и динамических электрических параметров [15]. В табл. 2 приведены наиболее часто измеряемые параметры ИМС [15–17].

Таблица 2

Измеряемые электрические параметры КМОП ИМС

Статические параметры	Динамические параметры
Ток потребления в статическом режиме	Время задержки включения и выключения
Ток потребления при высоком и низком уровне выходного напряжения	Время задержки распространения сигнала при включении и при выключении
Входной ток низкого и высокого уровня	Время перехода при включении и выключении
Напряжение блокировки	Максимальная тактовая частота
Выходное напряжение низкого и высокого уровня	Другие динамические параметры в зависимости от функционального назначения ИМС (время восстановления, время выборки адреса и др.)
Выходной ток низкого и высокого уровня	
Ток короткого замыкания	

Общие методы измерения и контроля электрических параметров цифровых ИМС регламентированы НТД [15–17].

Функционирование ИМС в условиях КП осложнено влиянием следующих факторов:

- естественные радиационные пояса Земли (ЕРПЗ);
- солнечные космические лучи (СКЛ);
- галактические космические лучи (ГКЛ);
- отдельные и тяжелые заряженные частицы (ОЗЧ и ТЗЧ).

Под влиянием таких факторов возможно возникновение структурных изменений кристаллической решетки полупроводниковых материалов, а также ионизационных процессов в активных и пассивных областях слоев [18].

Следует упомянуть, что при воздействии мощного радиоизлучения у КМОП-микросхем наблюдаются обратимые и необратимые отказы, в отличие от ТТЛ ИМС, у которых наблюдаются только необратимые отказы [19].

В условиях КП вследствие возникновения ионизационных импульсных токов из-за ионизационных эффектов в структуре ИМС существует вероятность возникновения кратковременных изменений логического состояния ячеек памяти, триггеров и регистров. В худшем случае эти токи могут вызвать радиационное защелкивание (тиристорную защелку) в КМОП-структурах либо вторичный пробой диэлектриков.

Исследования отказов ИМС специального назначения (СН) на борту КА проводят при наземной отработке изделий путем имитирования условий КП, так как при эксплуатации КА исследование отказов ЭКБ затруднено из-за ряда причин. Формирование условий космической среды также является большой проблемой из-за необходимости использования дорогостоящего оборудования, невозможности имитации отдельных условий либо принципиальной невозможности формирования отдельных космических условий на Земле.

При проведении радиационных испытаний ряда ИМС СН автором [18] были выявлены признаки наступления отказов, характеризующиеся повышением или понижением:

- статического тока потребления;
- динамического тока потребления;
- уровней напряжения логических нуля и единицы.

В табл. 3 представлена информация по постепенным отказам, связанным с деградацией материалов, наличием или образованием дефектов и происходящими эффектами в ИМС вследствие влияния условий окружающей среды [6, 13, 14, 19, 20]. В табл. 4 приведены данные о взаимосвязи отказов, возможных причинах их возникновения и дефектах ИМС СН из-за влияния радиационных факторов КП [18].

Таблица 3

Взаимосвязь видов отказов, причин их возникновения и возможных дефектов в КМОП ИМС

Отказ (сбой)	Возможные причины	Дефект
1	2	3
Разрушение корпуса	– электрические перегрузки (повышенное напряжение, ток или мощность); – тепловые перегрузки; – механические напряжения корпуса; – негерметичность	Наличие дефектов в структуре корпуса
Отслоение кристалла	– тепловые перегрузки; – дефекты соединения кристалла с подложкой; – нарушения при технологической операции склеивания или пайки кристалла и корпуса	Неподходящий состав адгезива (преформы). Нарушение технологической операции монтажа
Повреждение оксидных слоев	– электростатический разряд; – наличие пор (тонких отверстий в оксидном слое); – влияние ионизирующего и радиационного излучения	Пустоты, микротрещины, поры в оксидном слое
Электрические разрушения	– электрическая перегрузка; – избыток влаги; – загрязнения	Наличие дефектов в структуре корпуса
	– наличие эффекта электромиграции в проводниках; – влияние высокой температуры	Наличие каналов протекания токов высокой плотности, пустот, холмиков. Дефекты на границах слоев

Продолжение табл. 3

1	2	3
Возрастание обратных токов <i>p-n</i> -переходов, дрейф коэффициента усиления в транзисторах	<ul style="list-style-type: none"> – диффузия примесей вдоль дефектов, влекущая появление тонких участков в базе; – дефекты кристаллической решетки вблизи сильно легированного <i>n</i>⁺ слоя и слоя базы; – концентрация токов вблизи дефектов; – локальные перегревы областей, в которых проходит обратный ток переходов 	Наличие дефектов вблизи протекания токов в слоях
Дрейф тока стока <i>I_c</i> и крутизны <i>S</i> в КМОП транзисторах	<ul style="list-style-type: none"> – некачественное защитное покрытие; – наличие остатков травителя, фоторезиста, растворов промывки, остаточных газов, влаги и др.; – разгерметизация ИМС; – рост ионного заряда в оксидном слое за счет загрязнений с поверхности слоя; – скопление положительного заряда на границе оксидного и полупроводникового слоя; – образование инверсных каналов в слоях; – уменьшение ширины <i>p-n</i>-перехода у поверхности структуры 	Наличие загрязнений в объеме оксидного слоя и ионов (Na ⁺ , K ⁺ , Li ⁺ , H ⁺ , O ⁻) на его поверхности
Рост токов утечки	<ul style="list-style-type: none"> – загрязнения поверхности полупроводника, оксидного слоя; – загрязнение поверхности оксидного слоя; – загрязнения и (или) повреждения фотошаблонов; – наличие в оксидном слое протравленных участков; – паразитная диффузия через поры в оксидном слое; – наличие влаги в подкорпусном пространстве 	Наличие загрязнений на поверхности
	<ul style="list-style-type: none"> – растрескивание оксидного слоя; – накопление заряда в пассивирующем оксидном слое, появление инверсного слоя 	Наличие микротрещин в оксидном слое
	<ul style="list-style-type: none"> – высокие погрешности фотолитографического процесса; – паразитные диффузии примесей через увеличенные окна в оксидном слое 	Увеличение размеров окон в оксидном слое
	<ul style="list-style-type: none"> – наличие трещин, отходящих от линий скрайбирования; – наличие трещин из-за разных коэффициентов термического расширения используемых материалов слоев; – воздействие механических напряжений 	Наличие трещин, проходящих через активную область структуры
Дрейф пробивного напряжения	<ul style="list-style-type: none"> – низкокачественный полупроводник; – появление эффекта лавинного пробоя из-за усиления электрического поля вблизи загрязнений; – проплавление металлизации через слои диффузии 	Наличие загрязнений в структуре полупроводника
Снижение пробивного напряжения	<ul style="list-style-type: none"> – загрязнения поверхности полупроводника, оксидного слоя, фоторезиста; – недостаточная адгезия фоторезиста; – загрязнение поверхности оксидного слоя или фоторезиста; – загрязнения и (или) повреждения фотошаблонов; – наличие в оксидном слое протравленных участков; – паразитная диффузия через поры в оксидном слое 	Наличие пор в оксидном слое

1	2	3
Короткое замыкание	– низкогокачественный полупроводник; – появление эффекта лавинного пробоя из-за усиления электрического поля вблизи загрязнений; – проплавление металлизации через слои диффузии	Наличие загрязнений в структуре полупроводника
	– электродиффузия кремния в алюминий в области положительного контакта; – замыкание <i>p-n</i> -перехода при длительном прохождении тока большой плотности тока ($i \approx 10^{10}$ А/м ²) при высокой температуре (около 200 °С)	Наличие ямок травления на границе слоя металла и полупроводника
	– растрескивание оксидного слоя	Наличие микротрещин в оксидном слое
	– высокие погрешности фотолитографического процесса; – паразитные диффузии примесей через увеличенные окна в оксидном слое	Увеличение размеров окон в оксидном слое
	– воздействие механических напряжений; – плохая адгезия металла к оксидному слою; – продольная миграция металла под оксидным слоем или защитным стеклом; – образование металлических закороток	Наличие металла или защитного стекла под оксидным слоем
	– отслаивание металлизации; – оседание частиц металла на поверхности кристалла	Наличие посторонних металлических частиц внутри корпуса ИМС.
Разрушение слоев металлизации, обугливание	– электростатические разряды; – коррозия; – электрические перегрузки; – тепловые перегрузки; – «усь» на металлизации; – проникновение влаги	Наличие пустот и пор в слое металлизации
Обрывы металлизации	– электродиффузия металла под действием большой плотности тока ($i \approx 10^{10}$ А/м ²) при высокой температуре (около 200 °С)	Наличие пустот у контактной площадки стоковой области
	– взаимодиффузия металлов при термокомпрессии, например Al-Au, Mo-Au, Ti-Au; – образование интерметаллических соединений; – снижение механической прочности контактов; – перегрев и оплавление перемычек между пустотами в местах контакта	Наличие пустот в термокомпрессионных контактах
	– электродиффузия металла в местах прохождения повышенных токов	Наличие пустот в металлизации
	– неравномерность металлизации; – разрывы на ступеньках оксидного слоя; – повышенная электродиффузия металла с локальным выгоранием слоя	Утончение металлизации
	– низкая адгезия металла выводов к контактным площадкам; – нарушение режима «вжигания» металла в полупроводниковый слой; – механические напряжения	Наличие отслаивания, раковин, царапин металлизации
	– сдвиговые воздействия на места контактов; – технологические дефекты в контактах	Разрыв или отслаивание вывода от контактной площадки
	– пережим вывода около места контакта; – перегрев места сужения при большом токе	Сужение вывода около места термокомпрессионного контакта

Таблица 4

Взаимосвязь видов отказов, причин их возникновения и возможных дефектов в КМОП ИМС из-за влияния радиационных факторов КП

Отказ (сбой)	Возможные причины	Дефект
Необратимые отказы из-за радиационных факторов		
SEL (Single Event Latchup) Радиационное защелкивание (включение паразитных тиристорных четырехслойных структур)	Усиление ионизационных токов паразитными биполярными транзисторами, влияние ОЗЧ и ТЗЧ	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEHE (Single Event Hard Error) Одиночный микродозовый отказ	Локальное выделение энергии в чувствительном объеме активного элемента ИМС из-за попадания ОЗЧ	
SEB (Single Event Burnout) Одиночный эффект выгорания транзисторной структуры	Открытие паразитного биполярного транзистора при попадании ОЗЧ	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEGR (Single Event Gate Rupture) Одиночный эффект пробоя подзатворного диэлектрика	Накопление заряда в макродефектах	
SES (Single Event Snapback) Одиночный эффект вторичного пробоя транзисторной структуры	Усиление ионизационных токов паразитными биполярными транзисторами, влияние ОЗЧ и ТЗЧ	
Короткое замыкание, снижение пробивного напряжения	«Пострадиационный эффект»: – захват носителей заряда макродефектами, соизмеримыми с толщиной оксидного слоя, вследствие ионизации диэлектрика; – термический выброс носителей заряда с макродефектов	
Обратимые отказы из-за радиационных эффектов		
SEU (Single Event Upset) Обратимый одиночный сбой (кратковременные изменения логического состояния ячеек памяти, кратковременная потеря информации)	Появление ионизационных импульсных токов из-за ионизационного излучения	Наличие макродефектов в диэлектрической пленке
SEFI (Single Event Functional Interrupt). Одиночный сбой прерывания функционирования (кратковременная потеря работоспособности)	Попадание ОЗЧ в чувствительную область ИМС	
SET (Single Event Transient) Переходная ионизационная реакция	Попадание ОЗЧ в чувствительную область ИМС	

Установлено, что в КМОП ИМС преобладающими дефектами являются дефекты оксидной пленки (более 60 % отказов) [14]. Был определен механизм деградации пленки, заключающийся в наличии макродефектов, которые в процессе функционирования ИМС накапливают заряд, причем более активно при воздействии ионизирующего излучения. Обнаружение таких макродефектов с помощью электрических методов затруднено, так как макродефекты электрически нейтральны. Поэтому применяют способы локализации макродефектов под влиянием климатических воздействий, например, способ контроля наличия макродефектов, заключающийся в последовательном применении облучения и термообработки [14, 20, 21]. При отсутствии макродефектов в оксидной пленке ИМС восстанавливает свои параметры после облучения и термообработки, иначе параметры не восстанавливаются [14].

Установлено, что КМОП ИМС космического назначения подвержены радиационным эффектам в активных элементах, при этом транзисторные структуры наиболее чувствительны к ним.

Основным признаком отказа КМОП ИМС СН при воздействии условий КП является выход значения тока потребления ИМС за установленные пределы, указанные в технической документации. Например, для КМОП БИС, имеющей структуру базового матричного кристалла (БМК), в ста-

тическом режиме работы ток потребления возрастает, в динамическом режиме – уменьшается. Для микросхем динамической памяти при наблюдении эффекта тиристорного защелкивания ток потребления ИМС также выходит за установленные пределы. Для микропроцессорных СБИС установлено, что отказ, как правило, определяется по повышенному значению статического тока потребления. Для ИМС энергонезависимой памяти при воздействии радиационных поражающих факторов отмечены массовые сбои в ячейках памяти. При отключении и последующем включении ИМС информация в ячейках не восстанавливалась, но в последующем ИМС оказывалась работоспособной [18].

Так как КМОП ИМС являются полупроводниковыми приборами, то они подвержены пострадиационному эффекту. В таком случае из-за наличия макродефектов в диэлектрических структурах ИМС через некоторое время возникают отказы при воздействии повышенной температуры после влияния низкоинтенсивного ионизирующего излучения (ИИ). «Дырки» накапливаются в макродефектах диэлектрика и на поверхности раздела слоев полупроводника и диэлектрика во время влияния ИИ и последующем освобождении положительного заряда с этих уровней, которое ускоренно протекает при повышенных температурах [20]. В таком случае величина пробивного напряжения снижается из-за наличия свободных «дырок», что может вызвать пробой диэлектрика.

Механизмы отказов КМОП ИМС

Исследование механизмов отказов ИМС позволяет заложить такие проектные и технологические нормы на этапе проектирования, конструирования и производства ИМС, которые позволяют значительно увеличить срок службы микросхем. В общем случае механизмы отказов формируются тремя факторами: конструкцией, технологией изготовления, режимом и условиями эксплуатации.

В качестве конструкционного отказа можно рассмотреть случай образования интерметаллического соединения $AuAl_2$ («пурпурной чумы») в месте контакта золотого проволочного вывода и алюминиевой металлизации. Такое соединение обладает низкой механической прочностью, что может вызвать обрыв проволоки. Такой отказ наиболее вероятен для ИМС, работающей в импульсном режиме.

Отказы ИМС, связанные с несовершенством технологии изготовления, происходят вследствие:

- дефектов полупроводниковой пластины («ростовые», т.е. возникающие при выращивании пластины и вносимые технологией изготовления);
- механических повреждений (сколы, трещины, царапины, микротрещины слоев);
- несовершенства контактов и монтажа (разбрызгивание металла по поверхности кристалла, низкое качество соединений проводов, слабый контакт токопроводящих элементов, образование коррозии);
- низкое качество герметизации (появление посторонних частиц, влаги);
- неточности фотолитографии (смещение слоев, наличие остатков частиц травителя, непротравы, плохая промывка);
- диффузии (недостаток или избыток диффузионного материала, искажение удельного сопротивления);
- дефектов металлизации (низкое качество омических контактов, впадения в кристалл, поры, царапины, изломы металлизации) [6, 13].

Наиболее часто эксплуатационные отказы связаны с использованием ИМС при повышенных температурах. В таком случае в некоторых местах структуры ИМС рассеиваемая мощность может оказаться выше допустимой, что может вызвать проплавление металлизации через диффузионные слои полупроводника либо электродиффузию атомов кремния в алюминий из-за высокой плотности токов [6].

Статистически основными причинами отказов ИМС являются дефекты, вносимые в процессе производства (около 90 %) и в результате нарушений правил эксплуатации (около 10 %) [22]. Половина отказов из-за несовершенства технологии изготовления ИМС связана с некачественными соединениями (пленочными, контактными на границе слоев, проволочными).

Отказы, вызванные деградацией материалов, обусловлены длительными процессами старения, изнашивания, коррозии, усталости при условии соблюдения всех норм проектирования, изготовления и эксплуатации. Стоит отметить, что протекание явлений деградации существенно ускоряется при наличии примесей и нестабильных дефектов полупроводника.

Во многих случаях деградиционные процессы в ИМС связаны со следующими явлениями:

- диффузией, т.е. процессом массопереноса внутри слоя, между слоями, на поверхности, в металлизации и т.д.;
- электромиграцией, т.е. процесса массопереноса внутри проводников под воздействием электрического тока;
- релаксацией внутренних механических напряжений;
- явлениями дефектообразования [13].

Дрейф пробивного напряжения и короткое замыкание внутри ИМС свидетельствуют об отказе вследствие различных причин и механизмов. Особого внимания заслуживает эффект электромиграции в металлизации, что наиболее вероятно в связи с тенденцией уменьшения размеров транзисторных структур ИМС и увеличением рабочих частот. Механизм заключается в столкновении токов высокой плотности с атомами кристаллической решетки. В некоторых случаях поток электронов выталкивает атом из решетки в сторону положительно заряженного электрода, что вызывает образование пустот. В этом месте электрическое сопротивление возрастает, что ведет к нагреву области. Многократно повторяющийся эффект ведет к разрушению проводника в одних зонах, образуя пустоты и лакуны (в англоязычной литературе – *void*), и к скоплению материала по пути протекания тока к положительному электроду, образуя холмики (бугорки, в англоязычной литературе – *hillock*). Разрушение проводника приводит к образованию узких каналов металлизации либо к обрыву контакта. Образование холмиков может привести к электрическому пробое слоёв диэлектриков, находящихся рядом с бугорками. В работах [23–25] эффект электромиграции описывается наиболее подробно с приведением математических моделей эффекта. Как правило, основной способ борьбы с электромиграцией заключается в изменении топологии ИМС после моделирования работы схемы [26].

Механические напряжения, возникающие в кристалле ИМС, по видам оказываемого воздействия на кристалл подразделяют на следующие виды:

- термические;
- концентрационные;
- структурные и межфазные [27].

Результатом влияния механических напряжений является увеличение концентрации и подвижности точечных дефектов и образование макроскопических дефектов, влияющих на параметры ИМС [28]. Установлено, что образование механических напряжений вблизи транзисторных структур приводит к усилению зависимости величины обратного тока от напряженности электрического поля [29].

Стоит упомянуть, что полупроводниковые пластины, являющиеся конструктивной основой ИМС, изначально в своем объеме имеют дефекты кристаллической решетки и вкрапления примесных атомов. Например, в кремниевых пластинах основными примесями, значительно влияющими на электрофизические характеристики ИМС, являются атомы кислорода и углерода. Как правило, концентрация атомов кислорода в кремниевых пластинах, изготовленных эпитаксиальным наращиванием по методу Чохральского, составляет $2 \cdot 10^{18} - 10^{17}$ атом/см³, методом зонной плавки – 10^{16} атом/см³. Концентрация атомов углерода в кремнии составляет $10^{16} - 10^{17}$ атом/см³, причем их концентрация неравномерна из-за малого коэффициента сегрегации [13]. Атомы кислорода влияют на возникновение, движение и размножение дислокаций. Кроме этого, технологический процесс изготовления полупроводниковых ИМС включает в себя операции диффузии донорных и акцепторных примесей. Таким образом, распределение примесных атомов в объеме полупроводника неоднородно, что влияет на процент выхода годных ИМС и определяет основные характеристики схемы и уровни шума [30–33].

Заключение

В работе представлена информация по отказам КМОП-микросхем, учитывающая общие закономерности для данной технологии. Информация предназначена для разработки и совершенствования способов повышения надежности микросхем.

Для процедуры индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности КМОП ИМС приведенные в работе сведения о признаках отказов показывают, что в большинстве случаев в качестве прогнозируемого параметра следует выбирать ток утечки, так как он свидетельствует о широком спектре возможных причин отказов и возможных дефектах структуры. Изменение величин

ны пробивного напряжения также может быть вызвано достаточно широким набором возможных причин и дефектов. Выбор других параметров в качестве прогнозируемых может быть обоснован при подозрениях о наличии определенных дефектов в структуре ИМС, вносимых технологическим процессом производства, либо низким качеством комплектующих.

Библиографический список

1. *Абрамов, О. В.* Актуальность проблемы обеспечения надежности / О. В. Абрамов // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 3–7.
2. *Абрамов, О. В.* Существует ли в нашей стране проблема надежности? / О. В. Абрамов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 5–6.
3. *Авакян, А. А.* Закон распределения отказов элементов и систем электроники / А. А. Авакян, А. Г. Дмитриенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 47–53.
4. *Tyulevin, S. V.* Methods of bipolar microcircuits learning experiment / S. V. Tyulevin, M. N. Piganov, E. S. Erantseva // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1904. – P. 209–213.
5. *Саушев, А. В.* Структура процесса управления состоянием сложных электротехнических систем / А. В. Саушев // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3. – С. 23–30.
6. *Готра, З. Ю.* Контроль качества и надежность микросхем : учебник для техникумов / З. Ю. Готра, И. М. Николаев. – М. : Радио и связь, 1989. – 168 с.
7. *Пиганов, М. Н.* Индивидуальное прогнозирование показателей качества элементов и компонентов микросборок / М. Н. Пиганов. – М. : Новые технологии, 2002. – 267 с.
8. *Пиганов, М. Н.* Прогнозирование надежности радиоэлектронных средств / М. Н. Пиганов, С. В. Тюлевин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып. 1. – С. 175–182.
9. *Тюлевин, С. В.* Структурная модель индивидуального прогнозирования параметров космической аппаратуры / С. В. Тюлевин, М. Н. Пиганов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – Вып. 1. – С. 92–96.
10. *Piganov, M.* Individual prognosis of quality indicators of space equipment elements / M. Piganov, S. Tyulevin, E. Erantseva // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 367–371.
11. *Mishanov, R.* Individual forecasting of quality characteristics by an extrapolation method for the stabilitrons and the integrated circuits / R. Mishanov, M. Piganov // The experience of designing and application of CAD systems in Microelectronics (CADSM 2015) : Proceeding XIII international conference. – Ukraine, Lviv, 2015. – P. 242–244.
12. *Федоров, В. К.* Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. К. Федоров, Н. П. Сергеев, А. А. Кондрашин ; под ред. В. К. Федорова. – М. : Техносфера, 2005. – 205 с.
13. *Горлов, М. И.* Геронтология кремниевых интегральных схем / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, А. В. Строгонов ; отв. ред. Б. И. Казуров. – М. : Наука, 2004. – 240 с.
14. *Харченко, В. А.* Проблемы надежности электронных компонентов / В. А. Харченко // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 1 (69). – С. 52–57.
15. ГОСТ 18683.0-83. Микросхемы интегральные цифровые. Общие требования при измерении электрических параметров.
16. ГОСТ 18683.1-83. Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения статических электрических параметров.
17. ГОСТ 18683.2-83. Микросхемы интегральные цифровые. Методы измерения динамических электрических параметров.
18. *Иванов, А. О.* Экспериментальные исследования радиационной стойкости элементной базы бортовой аппаратуры космических аппаратов / А. О. Иванов, А. Г. Кохановский, Г. В. Кремез, В. П. Лачугин // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2013. – № 641. – С. 12–18.
19. *Пирогов, Ю. А.* Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения / Ю. А. Пирогов, А. В. Солодов // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 6. – С. 1–38.
20. *Попов, В. Д.* Пострадиационный эффект в ИС. Неразрушающий контроль качества ИС / В. Д. Попов // Электроника : Наука, Технология, Бизнес. – 2002. – № 4. – С. 36–41.
21. MIL-STD-883E. Method 1019.5. Ionizing radiation (total dose) test procedure.
22. *Романова, М. П.* Сборка и монтаж интегральных микросхем : учеб. пособие / М. П. Романова. – Ульяновск : УлГТУ, 2008. – 95 с.
23. *Blech, I. A.* Electromigration in Thin Aluminum Films on Titanium Nitride / I. A. Blech // Journal of Applied Physics. – 1976. – Vol. 47. – P. 1203–1208.
24. *Black, J. R.* Mass transport of aluminum by momentum exchange with conduction electrons / J. R. Black // Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium. – 1967. – P. 148–159.
25. *Averbuch, A.* Computation for electromigration in interconnects of microelectronics devices / A. Averbuch, M. Israeli, I. Ravve, I. Yavneh // Journal of Computational Physics. – 2001. – Vol. 167. – P. 316–371.

26. Синтез топологии стандартных КМОП ячеек с учетом эффекта электромиграции / В. П. Розенфельд, Л. А. Зинченко, Р. Л. Мазияс, Ю. Г. Смирнов, С. В. Сомов, И. Г. Топузов // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2008 : сб. науч. тр. / под общ. ред. А. Л. Стемпковского. – М. : ИППМ РАН, 2008. – С. 120–125.
27. Соколов, В. И. Физические аспекты надежности интегральных схем / В. И. Соколов, С. Н. Лавренко // Физические аспекты надежности интегральных схем : сб. тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Воронеж, 1993. – С. 42–44.
28. Беренштейн, Г. В. Прогнозирование качества ИС на основе анализа внутренних напряжений / Г. В. Беренштейн, А. М. Дьяченко // Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов : сб. тез. докл. 3-й всес. конф. – Кишинев, 1991. – Ч. II. – С. 136.
29. Грушко, Н. С. Диагностика надежности кремниевых фотоприемников с p-n переходом / Н. С. Грушко, С. В. Бунярский // Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов : сб. тез. докл. 3-й всес. конф. – Кишинев, 1991. – Ч. II. – С. 127.
30. Малинин, А. Ю. Анализ требований к полупроводниковым приборам / А. Ю. Малинин, Ю. Н. Кузнецов, Л. А. Иванютин, Б. В. Кутубидзе // Электронная техника. Сер.: Материалы. – 1978. – Вып. 3. – С. 34–39.
31. Горячев, Н. В. Структура автоматизированной лаборатории исследования теплоотводов / Н. В. Горячев, И. Д. Граб, А. В. Лысенко, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 119–120.
32. Юрков, Н. К. Технология производства электронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб., 2014. – 480 с.
33. Юрков, Н. К. Алгоритм моделирования процессов развития латентных технологических дефектов печатных плат / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Е. А. Данилова // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 : сб. тр. – М. : Изд-во ИПУ РАН, 2014. – С. 7092–7097.

Мишанов Роман Олегович

аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: mishanov91@bk.ru

Пиганов Михаил Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Перевертов Валерий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра наземных транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет путей сообщения
(443066, Россия, г. Самара, Первый безымянный пер., 18)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Mishanov Roman Olegovich

postgraduate student,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Piganov Mikhail Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of construction and technology of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
named after academician S. P. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Perevertov Valeriy Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of land transport and technological means,
Samara State University
of Way of Communication
(443066, 18 The first nameless lane, Samara, Russia)

УДК 621.382**Мишанов, Р. О.**

Выбор электрических параметров КМОП ИМС специального назначения для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности / Р. О. Мишанов, М. Н. Пиганов, В. П. Перевертов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 2 (22). – С. 43–54. – DOI 10.21685/2307-4205-2018-2-6.