

УДК 621.3.049

ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

© 2015 г. В. А. Харченко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Вычислительный центр РАН им. А. А. Дородницына»,
ул. Вавилова, д. 40, Москва, 119333, Россия

Введение

Рассмотрены проблемы повышения надежности электронных компонентов (ЭК), используемых для производства высокотехнологичной продукции. На основе анализа литературных данных выделены два направления решения проблемы. Первое направление — отбраковка ЭК на входном контроле с применением специальных методов тестирования, совмещенная с электротермотренировкой по программе испытаний. Такие испытания позволяют выявить компоненты со «скрытыми дефектами», поддельные или контрафактные компоненты, а также компоненты с несовместимыми конструктивными материалами по своим электрофизическим свойствам как между собой, так и с условиями эксплуатации приборов у потребителя. Второе направление обусловлено особенностями создания ЭК с наноразмерными параметрами. В этом случае при проектировании приборов преимущественно применяют модульный принцип, который позволяет существенно снизить нагрузки на отдельный элемент, а при нарушении работы отдельного модуля он исключается из общей схемы с реконfigurацией структуры ЭК. Показано, что в общем случае проблема повышения надежности является комплексной задачей разработки оптимальной структуры элемента ИС, обоснованного выбора материалов и оптимизации схемотехнических решений с последующими испытаниями на входном контроле у потребителя.

Ключевые слова: электронные компоненты, надежность, отбраковочные испытания, совместимость материалов, наноразмерные структуры, схемотехнические решения, резервирование.

Параметр надежности определяет период времени, в течение которого изделие сохраняет свои свойства. По данным открытой печати в космической отрасли и медицине, этот период достигает 30 лет, в военной и гражданских отраслях — колеблется в пределах 15—25 лет. К сожалению, российская промышленность в настоящее время не в состоянии обеспечить столь высокие показатели надежности. Об этом красноречиво свидетельствуют участвовавшие аварийные ситуации с российскими космическими объектами, а также возрастающий поток претензий от потребителей высокотехнологичной продукции (ВП). Исследования причин отказов показали, что наиболее ненадежным элементом устройств являются электронные компоненты (ЭК). Так, согласно работе [1], используемые ЭК российского и доступного иностранного производства (коммерческой и (или) индустриальной категории) не в состоянии обеспечить требуемый комплекс технических характеристик космических аппаратов, сроки их активного существования на орбите в условиях воздействия факторов космического пространства. В частности, спутники, обеспечивающие работу российской системы ГЛОНАСС, сохраняют свою работоспособность не более 3 лет, в то время как объекты си-

стемы GPS активно работают до 30 лет.

Цель работы — исследование факторов, отрицательно влияющих на надежность электронных компонентов, и путей их устранения как на стадиях разработки и изготовления, так и в процессе эксплуатации.

Организация отбраковочных испытаний

Одним из вариантов решения проблемы повышения надежности электронной системы изделий является организация комплекса дополнительных испытаний ЭК у потребителя. Комплекс предусматривает входной контроль, отбраковочные испытания, диагностический неразрушающий контроль, выборочный разрушающий контроль. В результате выбраковываются наиболее ненадежные компоненты. Для повышения надежности электронной системы в целом в необходимых случаях применяют многократное резервирование наиболее важных составных частей, а также устанавливают щадящий режим работы ЭК. В общем случае входной контроль проводится в объеме приемо-сдаточных испытаний, включающих проверку внешнего вида и электрических параметров, отражающих качество изделий. Отбраковочные испытания включают в себя электротермотрени-

Харченко Вячеслав Александрович — доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник,
e-mail: vakh41@mail.ru

ровку, термоциклирование, выдержку при повышенной температуре. Диагностический неразрушающий контроль проводят по информативным параметрам в режимах и условиях, способствующих проявлению дефектов, а также по результатам оценки дрейфа параметров после испытаний. При выборочном разрушающем физическом анализе оценивается сохранение конструктивно-технологических параметров ЭК.

Несмотря на предпринимаемые меры, проблема надежности ЭК, используемых в создании электронных систем ВП, остается актуальной в связи с некоторыми развивающимися отрицательными тенденциями на рынке ЭК.

Первая тенденция связана с увеличением применения в военной технике (ВТ) коммерческих ЭК, вызванного настоятельной необходимостью снижения финансовых затрат на разработку и испытание изделий, сокращения сроков постановки на производство. Эффективность использования ЭК индустриального уровня в изделиях ВТ по сравнению с ЭК военного и космического уровня показана на рис. 1 [2]. Из рис. 1 видно, что цена ЭК индустриального уровня существенно ниже цен ЭК военного и космического уровня, но при этом другие показатели заметно выше.

Вторая тенденция связана с увеличением представительства на рынке ЭК новых фирм из Китая, стран Юго-Восточной Азии и других регионов, производящих компоненты сомнительного качества. Так, военное ведомство США, обеспокоенное участвовавшими случаями отказов в работе критически важных систем ВТ, запретило применение ЭК китайского производства [3].

Третья тенденция заключается в увеличении на рынке ЭК доли контрафактной продукции. Сегодня эта доля достигает до 10 %. Учитывая наличие на рынке поддельных ЭК, а также низкое качество поставляемых изделий иностранного и отечественного производства посредниками и недобросовестными фирмами, предприятиям-изготовителям ВТ приходится предпринимать организационно-технические меры, препятствующие попаданию в радиоэлектронную аппаратуру ЭК несоответствующего качества. В работах [2, 4–10] дано описание процедур контроля качества и надежности электрорадиоизделий (ЭРИ), предназначенных для производства космической аппаратуры. На рис. 2 показана типичная зависимость интенсивности отказов от времени для ЭК в различном исполнении.

На первом этапе (этапе отбраковки) интенсивность отказов сначала возрастает,

затем после достижения максимума падает до стабильной величины. В период стабильной работы интенсивность отказов меняется незначительно. На третьем этапе интенсивность отказов снова возрастает в связи с физическим старением изделий. Точками показаны два режима отбраковки. Первый режим реализуется на заводе-изготовителе ЭК в службах технического контроля. Из рис. 2 видно, что времени отбраковочных испытаний на заводе-изготовителе совершенно недостаточно и в связи с этим потребителю попадают компоненты с высоким уровнем интенсивности отказов. Второй режим применяется при входном контроле предприятием-потребителем или в сертификационном центре. Отбраковка при входном контроле включает в себя и процесс тренировки ЭК. Причем режимы тренировки определяются составом и уровнем внешних воздействий. Каждый

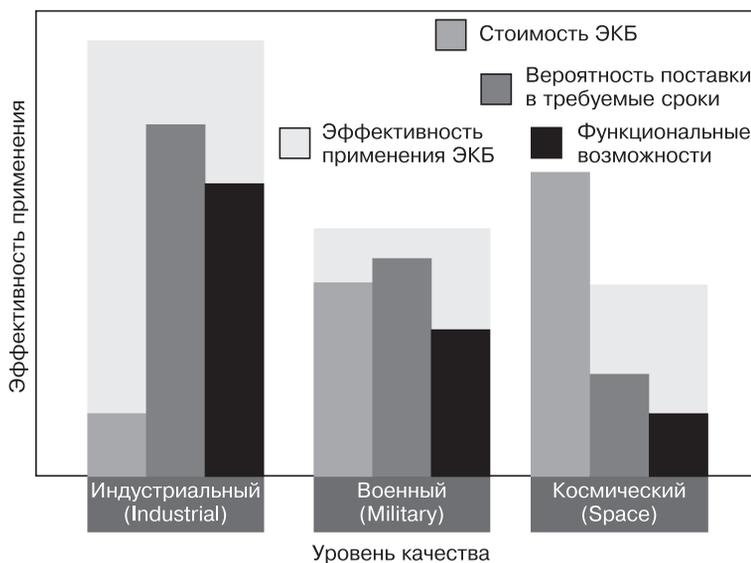


Рис. 1. Эффективность использования ЭК индустриального, военного и космического уровня качества в изделиях ВТ
 Fig. 1. Operation efficiency of industrial, military and space quality grade in high-tech products

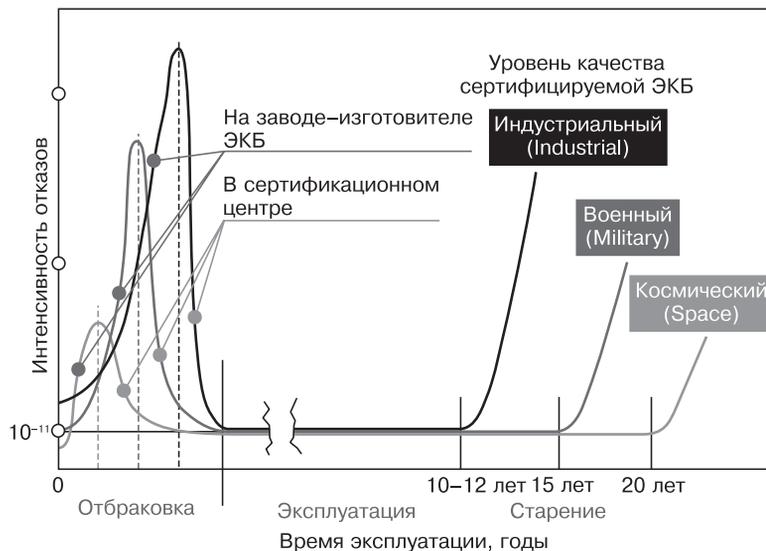


Рис. 2. Зависимости интенсивности отказов λ от времени эксплуатации ЭК
 Fig. 2. Failure rate as a function of electronic components running time

вид воздействий провоцирует развитие конкретных механизмов отказов. Для сокращения сроков тренировки ЭК проводят при повышенных температурах и напряжении. ЭК, у которых параметры при тренировке изменились выше установленных норм, бракуют. Таким образом, предотвращается попадание в ответственную аппаратуру ЭК ненадлежащей надежности. Необходимо отметить, что режимы тренировки выбирают такими, чтобы не вызвать в ЭРИ новых дефектов. Причем эффективность процедуры отбраковки возрастает при дополнительном использовании разрушающего физического анализа (**РФА**) изделий микроэлектроники [11]. В состав испытаний РФА входят: измерения электрофизических параметров, контроль содержания паров влаги внутри корпуса, визуальный контроль чипа, контроль качества монтажа с использованием растрового электронного микроскопа, проверка прочности внутренних соединений, испытания на сдвиг и другие физико-химические методы. В случае обнаружения дефектов изготовления или отклоняется партия изделий, или установленная для испытуемых ЭК базовая интенсивность отказов увеличивается в зависимости от критериев РФА.

Столь тщательное проведение сертификационных испытаний позволяет создать базы данных по типам отказов, статистике отказов, по схемотехническим решениям с возникшими в них отказами, поставщикам ЭК с характеристиками качества и надежности.

Ниже приведены наиболее часто встречающиеся виды отказов и причины их возникновения.

Вид отказа	Возможные причины
Разрушение корпуса	Электрическая и(или) тепловая перегрузки
Электрические разрушения	Электрическая перегрузка, избыток влаги, загрязнения
Механические повреждения	Деформация из-за разных коэффициентов теплового расширения
Отслоение кристалла	Дефекты соединения кристалла с подложкой
Разрушение слоев металлизации	Электростатические разряды, коррозия, электрическая и (или) тепловая перегрузки
Электромиграция	Протекающий ток
Повреждение оксидных слоев	Электростатический разряд, поры
Коробление	Механические напряжения при термоциклировании
Дефекты кристаллов	Дефекты в объемных полупроводниках

При проведении разрушающего физического анализа обнаруживаются следующие типичные

нарушения конструктивно-технологических параметров:

- превышение содержания паров воды;
- остатки флюса и другие загрязнения на поверхности кристаллов;
- закрепленные и незакрепленные инородные частицы;
- коррозия;
- растравленные участки основного оксида;
- перемычки между коммутационными шинами;
- неполное закрепление кристалла на подложке.

В связи с резким снижением, а скорее, практически с полным прекращением производства радиационноустойчивых ЭК, разработчики спутниковых систем были вынуждены использовать ЭК коммерческой категории. Очевидно, эти компоненты не столь надежны и обладают низкой радиационной стойкостью. Другими словами, для коммерческой категории попадание дефектных ЭК более вероятно, чем для ЭК, изготовленных по специальной «радиационно-стойкой» технологии. Проблема решается с помощью отбраковки дефектных компонентов (или выборки из партии качественных изделий) [12].

Известно, что в КМОП ИС более 60 % отказов обусловлены дефектами оксидной пленки. Экспериментально было установлено, что некоторые дефекты структуры могут образовывать скопления — макродефекты. Накопление заряда в макродефектах в процессе работы вызывает деградацию ИС и в конечном счете приводит к их отказу. Следует отметить, что ни после изготовления, ни после термотренировок выявить наличие макродефектов по электрическим измерениям не удастся, так как они электронейтральны. Экспериментально установлено, что эффективно дефекты оксидной пленки заряжаются под воздействием ионизирующих излучений. Дополнительная зарядка макродефектов, если они присутствуют в пленке, происходит и в процессе последующей термообработки при заданной температуре. Таким образом, было экспериментально показано, что после облучения и термообработки ЭК восстанавливают свои параметры, если в оксидной пленке отсутствуют макродефекты, и не восстанавливают в противном случае — при наличии в них макродефектов. Отобранные ЭК с восстановленными параметрами могут быть использованы в космических системах. Указанные испытания с помощью операции «облучение—термообработка» нашли отражение в национальных стандартах ряда стран.

Следует иметь в виду, что применение радиационно-термической обработки не выявляет все потенциально ненадежные ЭК, и при эксплуатации возникают случайные отказы. Проблему решают с помощью введения различных видов избыточности: аппаратной, режимной и информационной. Примером информационной избыточности может

служить кодирование информации (например, код Хеминга). В совокупности комплексное применение различных приемов повышения надежности даже для изделий коммерческой категории позволяет довести интенсивность случайных отказов до уровня требований космической категории $1 \cdot 10^{-8}$ — $1 \cdot 10^{-9}$ ч⁻¹ в пересчете на ЭК.

Функциональная совместимость материалов

Рассмотрим еще один пример зависимости степени надежности ЭК от их режима работы и вида конструкционных материалов. В работе [13] исследовали СВЧ-транзисторы, работающие в импульсном режиме. Показано, что в большинстве случаев отказ СВЧ-транзисторов происходит по причине разрушения целостности проводников. Особенно это характерно для транзисторов, в которых в качестве проводника используют алюминий. В процессе активной работы процесс разрушения проводников наблюдается по достижении порядка 10^6 имп. При импульсном выбросе СВЧ-мощности происходит циклическое изменение температуры активного элемента транзистора и проводников «нагрев—охлаждение», приводящее к циклическому процессу расширения—сжатия. Следовательно, в проводниках возникают циклические механические напряжения. Так как алюминий не обладает высокой стойкостью к усталости металла при изгибе, то разрушение целостности проводника происходит при достаточно низких значениях количества импульсов. В отличие от алюминия, золото, например, обладает лучшими электрофизическими и механическими характеристиками. Поэтому оно находит применение в тех случаях, когда требуется повышенная надежность. В свою очередь, алюминий чаще применяют, когда не требуется высокая надежность, но критична цена. Отметим, что разрушения происходят, как правило, в точке крепления проводника к поверхности.

Другой причиной нарушения электрического контакта является образование интерметаллических соединений в точке крепления соединительного проводника на кристалле. Такая ситуация возникает, когда транзистор изготовлен с использованием алюминия, а корпус — с золотым напылением. При контакте алюминия и золота возможно образование интерметаллического соединения — «пурпурной чумы» — красноватого соединения $AuAl_2$ с низкой механической прочностью. В связи с этим использование связки золота и алюминия пагубно сказывается на надежности ЭК, особенно работающего в импульсном режиме.

Оптимизация структуры электронных компонентов

В заключительной части рассмотрим проблемы надежности при освоении ЭК с нанометровыми нормами. На очередном мировом форуме — ежегодной

Международной конференции по электронным приборам (6—9 декабря 2010 г., Сан-Франциско) было отмечено, что важнейшим аспектом новейшей микроэлектроники является надежность микросхем, так как новые перспективные технологии не могут гарантировать создание высоконадежных компонентов [14]. В связи с этим необходимы методы проектирования надежных электронных систем, изготавливаемых с использованием ЭК с низкой надежностью. Можно выделить несколько фундаментальных проблем, определяющих надежность будущих микросхем с наноразмерными топологическими нормами:

- влияние на надежность первоначальной обработки, а также температурной нестабильности смещения;

- влияние на надежность медной металлизации и диэлектриков с низким k , следующих факторов: электромиграции, формирования микропор под воздействием механических напряжений и пробоя диэлектриков, зависящего от времени (TDDDB — *time depend dielectric breakdown*);

- влияние масштабирования и новых архитектур на защищенность приборов от электростатического разряда.

Кроме того, на надежность существенное влияние оказывают разбросы параметров элементов микросхемы, причем разброс этот вызван термодинамическими вариациями физических и химических процессов, сопровождающих изготовление микросхем [15]. Основными технологическими источниками возникновения вариаций параметров являются следующие:

- неоднородность распределения легирующих примесей и структурных дефектов в наноразмерных объемах полупроводника, колебания толщины диэлектрических слоев;

- зернистая структура металлических и поликристаллических пленок;

- искажения, возникающие при литографии.

Уменьшить влияние вариаций на надежность можно несколькими путями. Первый из них — совершенствование технологии изготовления и обоснование выбора функциональных материалов. Второй путь — оптимизация схмотехнических решений. Например, уменьшить разброс параметров, связанный с неоднородностью распределения легирующих примесей в структурах КМОП-транзисторов, можно за счет увеличения концентрации примеси в областях истока и стока и снижения ее в подзатворной области. Однако при этом возрастают токи утечки «сток-исток» через подложку. Для снижения этого эффекта приходится модифицировать структуру МОП-транзисторов путем создания изолирующего диэлектрического слоя. Отметим, что для получения исходных пластин кремния с однородным распределением легирующей примеси фосфора можно применить метод легирования с использованием ядерных реакций [16].

Разброс таких параметров, как ток утечки «затвор–сток», пороговое напряжение, максимальный ток открытого транзистора, удастся снизить за счет увеличения толщины подзатворного диэлектрика при пропорциональном увеличении его диэлектрической проницаемости. В реальных структурах применяется чаще всего двухслойный диэлектрик. Первый слой создается на основе диоксида кремния толщиной ~1 нм, второй — на основе смеси оксида алюминия и гафния или диоксида гафния. Для снижения влияния поликремния с явно выраженной крупнозернистой структурой на разбросы параметров элементов ИС в настоящее время вместо поликремния используют нитрид титана, силициды вольфрама и тантала, которые имеют почти аморфную структуру и выдерживают без изменения технологические термообработки. Для снижения сопротивления проводников применяют многослойные структуры с проводящим слоем меди.

Примером компенсации технологических вариаций за счет оптимизации схемотехнических решений является архитектура СБИС типа «сеть на кристалле». Другими словами, кристалл прибора представляет матрицу из нескольких десятков и даже сотен модулей с множеством каналов связи. Такая архитектура позволяет решать задачи энергосбережения, синхронизации, непрерывного контроля функционирования, поддержания работоспособности ИС за счет компенсации различных дестабилизирующих факторов.

Оценки геометрических параметров локального вычислительного модуля с элементами структуры размером 45 нм дают геометрическую область 2×2 мм², в которой можно разместить до $3 \cdot 10^6$ транзисторов и необходимые сигнальные связи. Этого достаточно для реализации базового процессорного блока с локальной памятью, коммутатором и дополнительными функциональными блоками.

Предложенная архитектура «сеть на кристалле» позволяет не только оптимизировать общее потребление энергии системой, но и повысить ее надежность. Для этого в каждый модуль встраиваются средства контроля, которые управляют режимом работы и отслеживают сохранение правильного функционирования модуля и микросхемы при изменении температуры среды, условий охлаждения, а также при деградации параметров элементов с течением времени.

Средства повышения надежности, закладываемые в структуру современных СБИС с элементами наноразмерного уровня, подразделяются на три группы. В первую группу входят логические средства. К ним относятся кодовая защита блоков памяти, каналов связи, а также реализация распределенных вычислений с четкой, иерархически распределенной структурой памяти и оптимальными путями обращений к ней. Если логические средства обеспечения надежности не будут реализованы, то

системы на основе процессоров, работающих на максимальной частоте, будут потреблять ток до 1000 А при напряжении 1,0—1,2 В. Возникнут проблемы с отводом тепла и распределением тока по кристаллу. Такие СБИС могут оказаться просто неработоспособными. Ко второй группе относятся средства комплексного управления режимами: температурой, напряжением питания, частотой синхросигнала, напряжением смещения. Кроме того, контролируются токи утечки, уровень импульсных помех в цепях питания, задержки логических элементов. Третья группа включает в себя средства управления резервами системы, в случае, когда за счет различных дестабилизирующих факторов уровень ошибок начинает превышать установленный предел. Управление резервами осуществляется центральным блоком управления, имеющим связи со встроенными средствами контроля двух первых групп. В случае необходимости центральный блок принимает решение об изменении конфигурации «сети на кристалле» и перераспределении ресурсов, что позволяет сохранить работоспособность системы и обеспечить ее надежность в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Заключение

Повышение надежности ЭК является комплексной проблемой, решение которой связано с оптимизацией структуры элементов ИС, обоснованным выбором конструкционных и технологических материалов и разработкой наиболее рациональных схемотехнических решений.

Библиографический список

1. **Хартов, В. В.** Космические проблемы электроники: перед употреблением — взболтать / В. В. Хартов // Электроника НТБ. – 2007. – № 7. – С. 22—25.
2. **Урличич, Ю.** Отбраковка контрафактной электронной компонентной базы в космическом производстве / Ю. Урличич, Н. Данилин, А. Степанов, Д. Чернов, А. Сашов, С. Белослудцев // Аэрокосмический курьер. – 2007. – № 1. – С. 76—77.
3. Контрафактные китайские чипы вызывают сбой в работе военной техники США / <http://haker.ru/2008/10/07/45479>
4. **Урличич, Ю.** Управление электронной компонентной базой в современных космических системах глобального позиционирования ГЛОНАСС / Ю. Урличич, Н. Данилин, А. Степанов, Д. Чернов, А. Сашов, С. Белослудцев // Аэрокосмический курьер. – 2007. – № 1. – С. 70—72.
5. **Урличич, Ю.** Алгоритм тестирования электронной компонентной базы для космических приборов системы ГЛОНАСС / Ю. Урличич, Н. Данилин, А. Степанов, Д. Чернов, А. Сашов, С. Белослудцев // Аэрокосмический курьер. – 2007. – № 1. – С. 73—75.
6. **Кобзарь, Д.** Процедурные вопросы применения электронных средств в военной технике: нормативная база и правда жизни / Д. Кобзарь // Стандартизация и сертификация. – 2007. – № 3. – С. 86—98.
7. **Урличич, Ю.** Противодействие проникновению контрафактных электронных компонентов на опыте создания ГЛОНАСС / <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/doc/6683>
8. **Палкин, С.** Поиск аналогов электронных компонентов / С. Палкин // Электронные компоненты. – 2001. – № 6.
9. **Чесноков, В.** Коммерческие компьютеры окончательно прописываются в военных системах / В. Чесноков // Computer Weekly. – 1998. – № 6. – С. 27—30.

10. Едигеев, Т. Надежность компонентов — от практики к опыту инноваций / Т. Едигеев // Компоненты и технологии. — 2005. — № 8.

11. Федосов, В. В. Повышение надежности радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов при применении электрорадиоизделий, прошедших дополнительные отбраковочные испытания в специализированных испытательных технических центрах / В. В. Федосов, В. Е. Патраев // Авиакосмическое приборостроение. — 2006. — № 10. — С. 50—55.

12. Попов, В. Проблемы и возможности применения коммерческих интегральных схем в военной и космической технике / В. Попов // Chip News. — 1999. — № 5. — С. 28—32.

13. Дидилев, С. Особенности использования золота и алюминия в мощных СВЧ-транзисторах, работающих в импульсном режиме / С. Дидилев // Компоненты и технологии. — 2010. — № 5. — С. 15—18.

14. Гольцова, М. IEDM-2010. Новые процессы, новые материалы / М. Гольцова // Электроника НТБ. — 2011. — № 1. — С. 124—134.

15. Адамов, Д. Учет особенностей микроэлектронных нанотехнологий при проектировании СВИС / Д. Адамов // Электроника НТБ. — 2007. — № 7. — С. 98—105.

16. Смирнов, Л. С. Легирование полупроводников методом ядерных реакций / Л. С. Смирнов, С. П. Соловьев, В. Ф. Стась, В. А. Харченко. — Новосибирск: Наука, 1981. — 180 с.

Статья написана по материалам междисциплинарного научно-практического семинара «Математическое моделирование в материаловедении электронных наноструктур», проведенного в ВЦ РАН имени А. А. Дородницына.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2014 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2015, vol. 18, no. 1, pp. 52–57.

Problems of Reliability of Electronic Components

Vyacheslav Aleksandrovich Kharchenko — Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher (vakh41@mail.ru)

**Institution of Russian Academy of Sciences
Dorodnicyn Computing Centre of RAS,
40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russia**

Abstract. This paper describes the problem of increasing the reliability of electronic components (EC) used for the fabrication of high-tech products. Two main ways of solving the problem are considered based on analysis of published data. One approach is Rejection of EC at the input control using special testing methods combined with burn-in test program. This testing reveals components with «hidden defects», counterfeit parts and components with incompatible construction materials both internal and with external service conditions. The other approach considers the feature of creating EC with nanoscale parameters. In this case the modular principle is applied for the design of devices that allows significantly reducing the loads on single elements, and malfunction of a discrete module causes its disconnection from the scheme followed by reconfiguration of the EC structure. We show that in general the problem of increasing reliability is a complex task related to developing an optimum structure of IC elements, informed choice of materials, testing and optimization of circuit solutions.

Keywords: electronic components, reliability, screening test, material compatibility, nanoscale structures, circuit solutions, reservation.

References

- Hartov V. V. Electronics cosmic problems. Before using please shake up. *Jeletronika NTB*. 2007, no. 7, pp. 22—25. (In Russ.)
- Urlichich Ju., Danilin N., Stepanov A., Chernov D., Sashov A., Belosludtsev S. Development of the contrafactual electronic component base. *Aerokosmicheskii kur'er = Aerospace courier*. 2007, no. 1, pp. 76—77. (In Russ.)
- Counterfeit Chinese chips cause failure in work of military equipment of the US / <http://xaker.ru/2008/10/07/45479/>
- Urlichich Ju., Danilin N., Stepanov A., Chernov D., Sashov A., Belosludtsev S. The management of electronic component base in the modern space global positioning system GLONASS. *Aerokosmicheskii kur'er = Aerospace courier*. 2007, no. 1, pp. 70—72. (In Russ.)
- Urlichich Ju., Danilin N., Stepanov A., Chernov D., Sashov A., Belosludtsev S. The testing algorithm for the electronic component

base of the GLONASS equipment. *Aerokosmicheskii kur'er = Aerospace courier*. 2007, no. 1, pp. 73—75. (In Russ.)

6. Kobzar' D. Points of order of application of electronic means in military equipment: regulatory base and facts of life. *Standartizatsiya i sertifikatsiya*. 2007, no. 3, pp. 86—98. (In Russ.)

7. Urlichich Ju. Counteraction to penetration of counterfeit electronic components on experience of creation of GLONASS. <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/doc/6683> (In Russ.)

8. Palkin S. Search of analogs of electronic components. *Jeletronnyye komponenty*. 2001, no. 6. (In Russ.)

9. Chesnokov V. Commercial computers finally register in military systems. *Computer Weekly*. 1998, no. 6, pp. 27—30. (In Russ.)

10. Edigeev T. Reliability of components: from practice to experience of innovations. *Komponenty i tehnologii*. 2005, no. 8. (In Russ.)

11. Fedosov V. V., Patraev V. E. Increase of reliability of the radio-electronic equipment of spacecrafts at application of the electroradio products which passed additional production tests in the specialized test technical centers. *Aviakosmicheskoe priborostroenie*. 2006, no. 10, pp. 50—55. (In Russ.)

12. Popov V. Problems and possibilities of application of commercial integrated schemes in military and space equipment. *Chip News*. 1999, no. 5, pp. 28—32. (In Russ.)

13. Didilev S. Features of use of aurum and aluminum microwave transistors working in the pulse mode. *Komponenty i tehnologii*. 2010, no. 5, pp. 15—18. (In Russ.)

14. Gol'cova M. IEDM-2010. New processes, new materials. *Jeletronika NTB*. 2011, no. 1, pp. 124—134. (In Russ.)

15. Adamov D. Taking into account nanotechnologies features when developing VLST. *Jeletronika NTB*. 2007, no. 7, pp. 98—105. (In Russ.)

16. Smirnov L. S., Solov'ev S. P., Stas' V. F., Kharchenko V. A. Legirovanie poluprovodnikov metodom jadernyh reakcij [Semiconductor doping by nuclear reaction method]. *Novosibirsk: Nauka*, 1981. 180 p. (In Russ.)

Acknowledgements. The article was written based on an interdisciplinary scientific and practical seminar «Mathematical Modeling in Materials electronic nanostructures», held in the Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS.

Received December 25, 2014