

Анализ физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных радиолокационных систем

© Н.И. Сидняев¹, В.П. Савченко², Д.В. Ключкова²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца», Москва, 127083, Россия

Рассмотрены проблемы повышения эффективности и надежности радиоэлектронного оборудования. Проведен анализ и синтез существующих отечественных и зарубежных методических подходов при испытании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), физики отказов с точки зрения оценки показателей надежности. Обоснованы целесообразность и направления совершенствования и внедрения РЭА в разрабатываемый в настоящее время комплекс государственных стандартов для проектирования радиолокационных систем. Показано место и роль физико-математических наук в теории надежности и случайных процессов. Исследованы вопросы наработки до отказа и интенсивности отказов. Выявлены области безопасной работы и механизмы деградационных отказов. Проведен анализ эффективных методов стабилизации поверхностного заряда в радиоэлектронных структурах, моделей усталостного разрушения контактных соединений в полупроводниковых приборах, а также анализ исследований микроскопических контактов алюминиевого проводника в интегральных схемах. Изучен механизм отказа алюминиевых межсоединений и токопроводящих элементов в зависимости от конструктивных особенностей и технологических режимов, а также отказ мощных транзисторов при рассогласовании нагрузки. В целях выявления дефектных приборов РЭА рассмотрено влияние ионизирующих излучений на деградацию электрических параметров интегральных схем и воздействие радиации. Изучены отказы кремниевых планарных транзисторов с помощью гамма-обработки, механизм старения керметных резисторов, отказы непроволочных переменных резисторов. Предложены методы физического прогнозирования отказов конденсаторов. Исследованы причины отказов высоковольтных керамических малогабаритных конденсаторов и высоковольтных высокочастотных керамических конденсаторов, а также влияние термоупругих напряжений как причины механической деструкции. Проведен анализ механизмов нарушения электрической прочности керамических конденсаторов высокого напряжения.

Ключевые слова: отказ, прогноз, надежность, радиоэлектронное оборудование, теория надежности, случайные процессы, наработка до отказа, интенсивность отказов, модели усталостного разрушения, контактные соединения, полупроводниковые приборы.

Введение. Основной проблемой, на решение которой направлены результаты аналитического обзора, является создание современной научно-производственной инфраструктуры разработки и производства радиоэлектронных средств и стратегически значимых систем с использованием российской электронной компонентной базы нового технологического уровня [1, 2].

Оценка надежности устройств, основанная на данных о физических свойствах материалов, о характеристиках элементов и воздействующих факторов, не только не исключает, но и предполагает использование вероятностных, статистических методов, поскольку эти характеристики представляют собой обычно случайные функции времени или случайные величины. Статистические методы широко применяют при исследовании физико-химических процессов в материалах и устройствах. Значительное число физических явлений и процессов на молекулярном, атомном, электронном уровнях может быть точно описано только с помощью теории вероятности и математической статистики, например методами статистической физики, статистической термодинамики и др. Детерминистические зависимости, характеризующие законы протекания физико-химических процессов, описывают осредненные явления и включают осредненные величины. При составлении эмпирических зависимостей используют средние значения из ряда наблюдений.

При рассмотрении физических явлений и процессов, обуславливающих возникновение отказов элементов и устройств, следует определить оптимальную степень детализации физического анализа, учитывая, что в конечном счете нас интересуют макроскопические характеристики состояния материалов, элементов, технических устройств. По-видимому, целесообразная степень детализации должна определяться не столько возможностью непосредственного использования физических закономерностей для инженерных расчетов надежности, сколько необходимостью глубокого физического анализа процессов для эффективного решения многих задач исследования и обеспечения надежности конкретных устройств.

Анализ физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов радиолокационных систем (РЛС) проведен с учетом следующих положений:

- электронная компонентная база и новые технологии сборки аппаратуры являются основой для разработки и производства радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) для РЛС нового поколения. Системы связи, телекоммуникаций и управления в технике, промышленности, социальной сфере и на транспорте связаны с технологиями и материалами двойного назначения. В совокупности они дают возможность применения изделий в экстремальных условиях эксплуатации (космическое пространство, земные недра, мониторинг обстановки вблизи источников излучений ядерных объектов, физические эксперименты, стихийные бедствия) и в специальной технике;

- совершенствование технологий и конструкций обеспечивает не только повышение функциональных и технических характеристик электронной компонентной базы, но и снижает нагрузку в целом на

проектирование и выпуск аппаратуры и систем для РЛС. Это объясняется тем, что задачи этапа проектирования РЛС, на котором выполняются сложные функции, переносятся на этап проектирования специализированных больших интегральных схем (ИС), а основной объем сборочных операций при выпуске аппаратуры заменяют процессами интеграции элементов при изготовлении сложнофункциональной электронной компонентной базы, выполняющей роль блоков и узлов аппаратуры.

Анализ исследований микроскопических контактов алюминиевого проводника в интегральных схемах. Закономерности протекания физико-химических процессов, оказывающих влияние на работоспособность элементов технических устройств, определяются, как правило, тем, что в этих процессах участвуют только частицы вещества (молекулы, атомы, электроны), обладающие энергией, значение которой не меньше, чем необходимо для преодоления энергетического барьера, препятствующего течению процесса. Перемещения и перегруппировки элементарных частиц, изменение их положения в кристаллической решетке, обуславливающие многие из этих процессов, могут проходить лишь в том случае, если энергия частиц превышает установленный для данного материала уровень, достаточный для преодоления связей между частицами.

При анализе надежности контакта алюминиевого проводника с золоченой балкой внешнего вывода ИС обычно исходят из предположения, что контакт реализуется парой алюминий—золото [3, 4]. Можно ожидать, однако, что в процессе присоединения выводов методом ультразвуковой сварки ввиду малой толщины слоя золота (3...5 мкм) большую или меньшую роль будет играть контакт алюминия с никелем, служащим в качестве подслоя для золота на коваровых балках внешних выводов ИС.

В качестве объекта исследования были взяты [5] серийные интегральные схемы, в которых алюминиевые проводники диаметром 35 мкм присоединяли ультразвуковой сваркой к коваровой балке внешнего вывода, покрытой электролитически слоем золота (3...5 мкм) с подслоем никеля (5...8 мкм). Микршлифы области контакта фотографировали с помощью микроскопа при увеличении в 1 440 раз. Кроме того, зарисовывали область контакта, видимую в микроскоп. После удаления при шлифовании слоя толщиной 2...3 мкм фотографирование и зарисовку повторяли. Таким образом, удалось получить изображения 30–40 сечений для каждого из 20 исследованных контактов алюминиевых проводников с балками внешних выводов восьми ИС. Характерный пример таких сечений представлен на рис. 1.

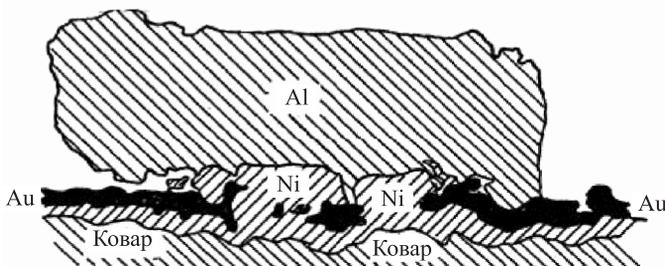


Рис. 1. Примерная структура сечения контакта

Анализ полученных микрофотографий исследованных контактов дает основание полагать, что 54,4 % площади сварного контакта приходится на пару Al–Ni; 32,5 % — на пару Al–Au; а 13,2 % площади контакта составляют поры, пустоты и другие дефекты. На рис. 2 показано построенное по данным микрофотографий распределение областей контакта алюминия с никелем и золотом для одного из исследованных контактов.

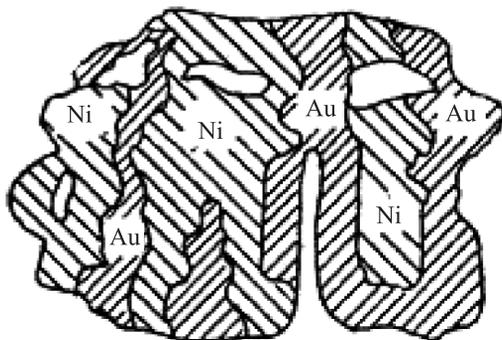


Рис. 2. Распределение областей контакта

При анализе влияния контакта алюминий—никель на надежность исследованного узла ИС следует исходить из того, что образующиеся в системе алюминий—никель интерметаллиды ($NiAl_3$, $NiAl$, Ni_2Al_3 , Ni_3Al , Ni_5Al [6]) обладают довольно высокими температурами плавления [3] и хорошими механическими свойствами [7]. Эту систему характеризуют также сравнительно высокие коэффициенты диффузии [8]. Известно, что выделение фазы $NiAl$ способствует упрочнению никелевых сплавов, содержащих алюминий, а Ni_3Al может служить основой для жаропрочных сплавов [8]. Анализ процессов сублимации алюминия и никеля из Ni_3Al показывает, что силы связи между разнородными атомами в этой системе преобладают над силами связи между однородными атомами. О больших значениях когезионных сил говорят и значения поверхностной энергии для этих материалов [9]. Следовательно, прочность контакта возрастает по мере увеличения доли, занятой парой

алюминий—никель. Прочность контакта при этом может возрастать по мере образования фаз NiAl и Ni₃Al. Процессу упрочнения контакта будет противодействовать образование хрупких интерметаллидов в системе алюминий—золото.

Анализ исследований механизма отказа алюминиевых межсоединений в ИС. Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей электромиграционного разрушения металлизации ИС в зависимости от конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров. На основе разработанной ранее модели электровибрационных отказов [2, 10] выявлено, что электромиграционные отказы действительно могут наблюдаться только при плотности тока, значение которого больше либо равно $0,5 \cdot 10^6$ А/см².

Наблюдаемые значения энергии активации электромиграционного разрушения зависят от микроструктуры пленки и условий испытаний и всегда меньше значений энергии активации самодиффузии в таком же тонкопленочном проводнике. Показатель степени плотности тока при отсутствии джоулевого нагрева не превышает значения 2 и растет с увеличением плотности тока. При джоулевом нагреве показатель степени может достигать значения 4—5. Должна существовать линейная связь между значениями энергии активации электромиграции и показатель степени плотности тока. Сильное влияние на параметры модели электромиграционного разрушения тонкопленочного проводника оказывает соотношение между размером зерна пленки и шириной проводника. Имеется область размеров зерен, при которых наработка до отказа при равенстве всех прочих параметров оказывается минимальной.

Тестовые структуры алюминиевой металлизации испытывались при значениях температуры 125, 150 и 175 °С и плотности тока $1 \cdot 10^6$ и $2,24 \cdot 10^6$ А/см². Анализ структур проводился на электронном микроскопе. В процессе испытаний контролировалось изменение сопротивления металлизации, которое может быть использовано как информативный и прогнозирующий параметр. Получены параметры закона распределения наработки до отказа и рассчитаны показатели надежности.

Анализ механизмов отказов токопроводящих элементов ИС в зависимости от конструктивных особенностей и технологических режимов. Задачей, решаемой при изучении физики отказов полупроводниковых приборов и ИС, является получение информации о механизмах протекания физико-химических процессов деградации, на основании которой в последующем может быть проведена корректировка конструкции изделий и технологии их изготовления в целях повышения надежности. Исследования, проводимые на тестовых структурах, дают

информацию, степень достоверности которой ограничена в силу неполной автомодельности условий испытаний конструктивно и технологически однородных элементов тестовых образцов и реальных структур полупроводниковых изделий. В связи с этим возникает необходимость изучения отказов в условиях, близких к тем, которые существуют при работе реальных полупроводниковых приборов и ИС, а также получения более детальной информации о параметрах, характеризующих физико-химические процессы деградации. Проводили также изучение отказов ИС вследствие деградации контактов металл—кремний, а также влияния на скорость деградации токопроводящих элементов (ТПЭ) таких факторов, как ступеньки SiO_2 и дефекты металлических пленок типа пор [3–5, 11].

В ходе исследований механизмов отказов проводили испытания специальных тестовых образцов при повышенных температурах (323...473 К) и плотностях тока ($2,2 \cdot 10^{10}$ А/м²). В процессе эксперимента изучено влияние температуры и времени вжигания, а также геометрии контактов на характер токораспределения, переходное сопротивление и надежность характеристики контактов, образованных вакуумным напылением алюминия, сплава Al—Si, Pd и других металлов на кремниевые подложки и последующей технологической обработкой. Одновременно проведен теоретический анализ токораспределения по ширине контакта. Решив обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с соответствующими граничными условиями, получим распределение тока в переходном слое по ширине контакта.

Исследования показали, что распределение тока в контактах металл—кремний зависит от соотношения поверхностного сопротивления кремния R_s и удельного переходного сопротивления контакта ρ_k , изменяясь от линейного при значениях $R_s/\rho_k < 1 \cdot 10^{10}$ м⁻² до экспоненциального при $R_s/\rho_k > 0,5 \cdot 10^{12}$ м⁻². Ширина контакта существенно влияет на среднее время работы до отказа (СВРО) при экспоненциальном распределении тока в контакте. В этом случае целесообразно ввести понятие оптимальной ширины контакта. При дальнейшем линейном увеличении ширины контакта СВРО увеличивается также линейно.

Анализ результатов исследований позволяет установить, что СВРО ТПЭ на ступеньках SiO_2 , высота которых составляет меньше 10 % толщины ТПЭ, уменьшается незначительно, а на ступеньках высотой порядка 4,5 % толщины ТПЭ составляет 35 % СВРО ТПЭ на гладкой поверхности SiO_2 . Причиной отказов является уменьшение толщины пленок и различная структура на ступеньке SiO_2 . Для ТПЭ, полученных по описанной технологии, дефекты типа пор оказывают влияние на надежность при толщине пленок меньше 0,6 мкм.

Анализ исследований и моделирования на ЭВМ электродиффузионных отказов структур мощных СВЧ-транзисторов. На основе длительных испытаний и экспериментальных исследований установлено, что главной причиной постепенных отказов, определяющих надежность мощных СВЧ-транзисторов при работе в статическом и СВЧ динамическом режимах, является процесс электродиффузии в контактной металлизации. Этот процесс приводит к образованию пустот и пор в металлической пленке при нарушении непрерывности электродиффузионного потока ионов [12]. В структуре транзистора пустоты формируются на границе раздела между различными материалами (Al и Mo) и между областями с различной структурой алюминия, например, между пленкой Al и внутренним проволочным выводом, между участками пленки Al, напыленной на различные подложки (Si, SiO, Mo), в области «горячих пятен» [13]. Характер и кинетика развития электродиффузионных повреждений транзисторной металлизации свидетельствуют о том, что эти повреждения вызваны микроскопическими неоднородностями (наличием контактов различных металлов, градиентов температуры, изменений структуры пленки), которые неразрывно связаны с конструкцией, технологией изготовления и режимом работы транзисторов. В то же время локальные структурные неоднородности металлизации влияют на развитие электродиффузионных отказов и обуславливают их вероятностный характер [13]. Известные модели электродиффузионных отказов полукристаллических пленочных проводников [14, 15] не отражают выявленные особенности причин возникновения и кинетики развития повреждений контактной металлизации транзисторных структур и, следовательно, не могут быть использованы для оценки показателей надежности мощных транзисторов.

Физико-статистические модели электродиффузионных отказов транзисторных структур представлены в работах [3, 4, 6, 12–15]. В них разработаны алгоритмы и программы, позволяющие проводить машинные испытания для оценки и прогнозирования показателей надежности транзисторов. Модели основаны на уравнении непрерывности потока ионов по границам зерен и статистической модели структуры полукристаллической пленки [14]. В этих моделях дополнительно учтены особенности развития отказов, геометрия металлизации, ее разогрев током, а также распределения плотности тока и температуры по структуре. В целях изучения влияния геометрии и структуры металлизации, конструкции и режима работы транзисторных структур на надежность проведены машинные испытания. Установлено, что время до возникновения отказов следует логарифмически нормальному распределению, для которого

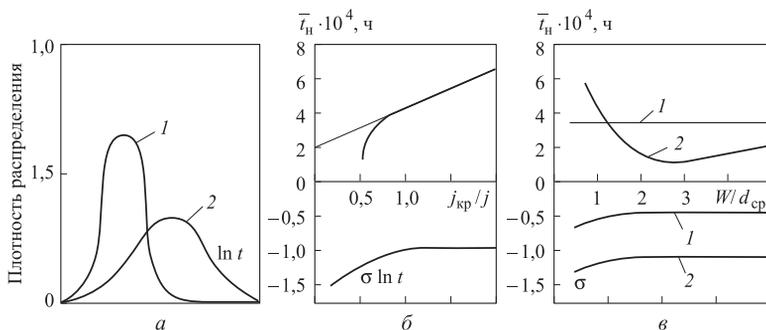


Рис. 3. Результаты машинных испытаний транзисторных структур:

a — зависимость плотности распределения от времени; *б, в* — среднее значение ожидания наработки от дисперсии; 1 — для отказов на границе раздела Al—Mo; 2 — для отказов, вызванных структурной неоднородностью пленки алюминия

среднее значение ожидания наработки \bar{t}_n и дисперсия $\sigma_{\ln t}$ зависят от вида отказа и режима работы (рис. 3, *a, б*). Например, выявлено, что при однородном токораспределении и $j < j_{\text{кр}}$ (где $j_{\text{кр}}$ — критическая плотность тока, при которой начинает сказываться собственный разогрев пленки Al) величина \bar{t}_n обратно пропорциональна j , а величина $\sigma_{\ln t}$ не зависит от режима (см. рис. 3, *б*). При образовании в структуре горячего пятна или при $j > j_{\text{кр}}$ указанные закономерности нарушаются, что следует учитывать при разработке форсированных испытаний. В этих исследованиях показано, что ширина W (или толщина h) металлизации (при $j = \text{const}$) практически не влияет на значение \bar{t}_n в случае отказов на границе раздела Al—Mo. В то же время для отказов, вызванных структурной неоднородностью пленки Al, наблюдается существенная зависимость $\bar{t}_n(W)$, которая при $W/d_{\text{ср}} = 2\text{—}3$ (здесь $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр зерна) имеет минимум (рис. 3, *в*). Сравнение результатов, полученных при машинных и натуральных испытаниях транзисторных структур, подтверждает адекватность построенных моделей электродиффузионных отказов металлизации.

Анализ влияния ионизирующих излучений на деградацию электрических параметров интегральных логических схем. В качестве объекта исследований в работах [3, 4] взяты ИС серий 106, 134, 149. Облучение производилось гамма-потокотом от источника Co60 активностью 13650 Ки и мощностью излучения $0,69 \cdot 10^6$ рад/ч до поглощенных доз $10^5 \dots 10^9$ рад, потоком электронов энергией 1 МэВ до поглощенных доз $10^6 \dots 10^9$ рад, а также нейтронным потоком до поглощенных доз $10^{11}, 10^{12}, 10^{14}$ н/см² · с.

Для более полного анализа влияния ионизирующих излучений на компоненты ИС целесообразно наряду с серийными схемами использовать ИС с тестовой металлизацией.

У каждой группы ИС с тестовой металлизацией изменялись электрические и шумовые параметры как схем в целом, так и их компонентов. Все партии схем были выполнены по единому базовому технологическому процессу. В ходе эксперимента было установлено, что деградация коэффициента усиления транзисторов логических схем при воздействии гамма-излучения начинается при дозе 10^6 рад, однако изменение электрических параметров схем в целом при этом не наблюдается. Изменение электрических параметров ИС начинается при дозах порядка 10^8 рад, когда коэффициенты усиления транзисторов падают до 50...70 % от первоначального значения. При дозе 10^9 рад ИС выходят из строя, причем наиболее критичным элементом логических ИС при радиационных воздействиях является выходной транзистор.

Наблюдались также отказы ИС после воздействия гамма-излучения при дозе 10^8 рад. У всех отказавших схем было отмечено аномальное значение избыточных шумов. Все испытуемые ИС подвергали облучению как в пассивном режиме, так и в режиме электрической нагрузки.

Анализ доотказовой деградации арсенидогаллиевых полупроводниковых приборов. Необходимо отметить, что для приборов, действие которых основано на эффекте Ганна (ПЭГ), характерен один вид отказа, выраженный в виде канала проплавления между электродами [17]. Поэтому автомодельность происходящих процессов старения ПЭГ, работающих в различных режимах, следует устанавливать с помощью анализа изменения параметров изделия [3]. В соответствии с изложенным в работах [4, 6, 17] исследование изменения низкополевого сопротивления ПЭГ, в технологии изготовления которых исключено быстрое старение омических контактов, позволяет выявить дислокационный механизм деградации ПЭГ. В этих работах проведена оценка эффективной энергии активации процесса старения и получено значение $\Delta E \sim 2,7$ эВ. Попытка точнее определить эту величину оказалась неудачной [11] ввиду недостаточного объема и статистической неоднородности результатов испытаний. Исследовано большое количество ПЭГ с трехслойными эпитаксиальными $n^+ - n - n^+$ -структурами, электродным материалом и термокомпрессионными выводами: со стороны анода вваривали молибденовую прокладку, со стороны катода — золотую проволоку. Во время кратковременных и длительных испытаний выявили дополнительные особенности процесса деградации, а также установили, что существует возможность получения ускоренной оценки надежности ПЭГ. Кратковременные испытания со ступенчато-возрастающей нагрузкой, проведенные по методике Рейнольдса [5], показали, что предельной тепловой нагрузкой ПЭГ является температура активной области

$T_{a \max} = 290 \dots 320$ °С, предельной электрической нагрузкой — рабочее напряжение $u_{0 \max} = 14$ В. В результате испытаний с различающимися длительностями ступенчатого воздействия установлено, что процесс старения ускоряется с возрастанием тепловой нагрузки (при постоянной электрической нагрузке) по закону Аррениуса — Эйринга с энергией активации $\Delta E \sim 2,0$ эВ. Длительные испытания ПЭГ в различных тепловых режимах подтвердили правильность этой оценки (рис. 4, 5). Обнаружено, что доотказовая деградация ПЭГ соответствует дислокационному механизму деградации и имеет следующие характерные особенности:

- скорость изменения низкополевого сопротивления R_0 , мощности генерации P_q , порогового $I_{п}$ и рабочего I_p тока и теплового сопротивления R_T конечны и возрастают к моменту наступления отказа;
- значение R_T возрастает в 2–3 раза к моменту отказа;
- пороговое ($u_{п}$) и пробивное ($u_{в}$) напряжения практически остаются неизменными в процессе старения.

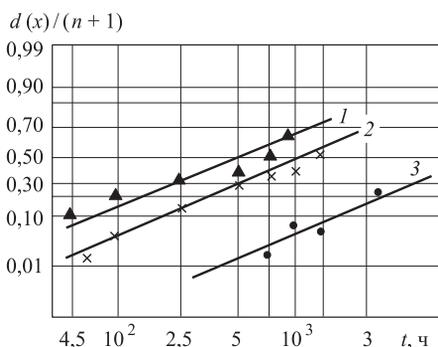


Рис. 4. Распределение отказов при температуре T_a параллельных испытаний трех выборок:
1 — 275 °С; 2 — 250 °С; 3 — 235 °С

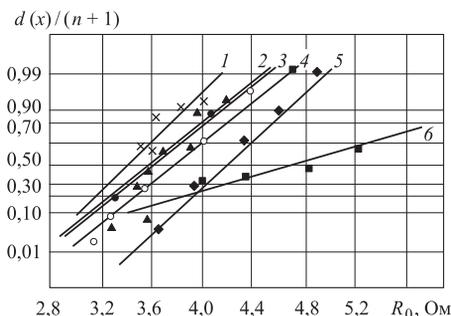


Рис. 5. Распределение величин ΔE во временном сечении при длительных испытаниях в форсированных режимах:
1 — 250 °С, до исп.; 2 — 235 °С, до исп.; 3 — после 100 ч при 235 °С;
4 — 275 °С, до исп.; 5 — после 1000 ч при 250 °С; 6 — после 1000 ч при 275 °С

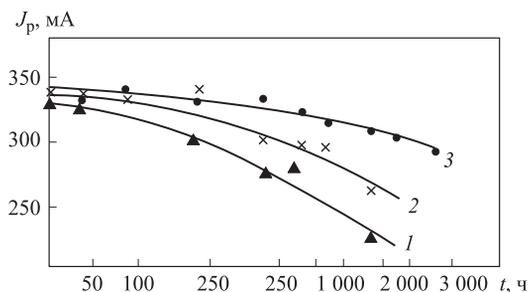


Рис. 6. Изменение среднеарифметического значения параметра J_p изделий АА703Б при температуре $T_{исп}$ параллельных испытаний:
1 — 175 °С; 2 — 150 °С; 3 — 135 °С

Уменьшение в процессе наработки рабочего тока I_p (рис. 6) свидетельствует об образовании высокоомного, неоднородного по поперечному сечению слоя, наличие которого одновременно понижает пороговый ток I_p и увеличивает тепловое сопротивление R_T . Это увеличение связано с тем, что в процессе наработки уменьшается эффективная площадь для потока мощности рассеяния за счет размножения дислокаций вблизи точки термокомпрессионной сварки, которые располагаются преимущественно в плоскости поперечного сечения активной области ПЭГ. Пороговое напряжение u_p остается неизменным, что дает возможность предполагать отсутствие заметной деградации омических контактов. Пробивное напряжение u_B неизменно в процессе деградации, что свидетельствует об отсутствии медленного изменения порога электротепловой неустойчивости.

Значение u_B изменяется практически в момент наступления отказа. Можно предполагать, что это связано с проращиванием ветви дислокации, ориентированной, согласно линиям тока, к области анода. Пока ветвь дислокации не касается области сильного поля, уходящего в анод домена, она практически не влияет на электропроводность ПЭГ.

Дислокационный механизм деградации ПЭГ приводит к различной энергии активации процесса старения, что выражается в отсутствии детального подобия в законах распределения отказов при длительной наработке ПЭГ. Получен именно такой характер статистических данных о распределении параметров в различных временных сечениях испытаний. Величина $\Delta E \sim 2,0$ эВ характеризует выборку в целом и пригодна для ускоренной оценки ее надежности. Однако применить ее для индивидуального прогнозирования нельзя.

Анализ отказов кремниевых планарных транзисторов с помощью гамма-обработки. Увеличение обратных токов утечки в полупроводниковых приборах объясняется образованием каналов вследствие инверсии в n - либо p -области кристалла. Образование каналов обусловлено различной степенью загрязненности поверхности

кристаллов заряженными ионами в процессе производства или ввиду разгерметизации корпуса прибора на этапе его применения. В $n-p-n$ -транзисторах коллекторные инверсионные слои указывают на наличие отрицательных ионов на поверхности оксида SiO_2 , а базовые инверсионные слои — на наличие положительных ионов (рис. 7).

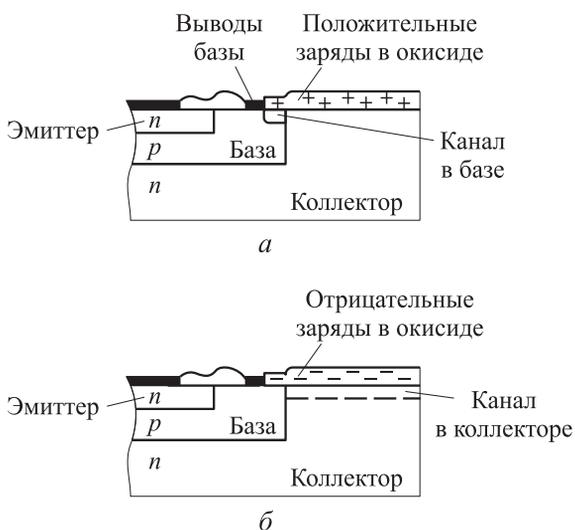


Рис. 7. Образование каналов в базовой (а) и коллекторной (б) областях $n-p-n$ -транзистора

При гамма-обработке транзисторов в слое SiO_2 образуются положительные заряды. Поэтому коллекторные инверсионные слои исчезают после облучения. Инверсионные слои в базе имеют тенденцию к более сильной инверсии [18]. Таким образом, гамма-обработка малыми дозами ($104 \dots 5 \cdot 10^5$ рад) позволяет определить наличие инверсионных слоев в базовой или коллекторной области кристалла кремниевых планарных транзисторов без вскрытия корпуса прибора.

Экспериментальное опробование гамма-обработки как неразрушающего метода диагностики отказов проводилось на кремниевых планарных транзисторах. Из партии транзисторов отобрали две группы приборов:

- с малым обратным током коллекторного перехода $I_k = 10^{-9}$ А (инверсионные каналы отсутствуют);

- с повышенным обратным током коллекторного перехода $I_k = 10^{-6}$ А (наличие каналов в базовой либо коллекторной области кристалла).

Гамма-обработка транзисторов дозой $5 \cdot 10^5$ рад не влияла на изменение параметров у приборов с малым обратным током I_k . При

наличия канала в коллекторной области значение тока I_k уменьшалось до 10^{-9} А, а у транзисторов с каналом в базовой области ток I_k имел тенденцию к увеличению до 10^{-5} либо к насыщению. Для подтверждения наличия инверсионных слоев и каналов проводилось фотографирование вскрытых транзисторов.

Таким образом, гамма-обработка малыми дозами может служить неразрушающим методом диагностики постепенных отказов кремниевых планарных транзисторов наряду с методом фотографирования, измерения емкости $p-n$ -перехода и другими методами.

Анализ механизма старения керметных резисторов. Применение гибридных интегральных микросхем в специальной и измерительной аппаратуре позволяет получать изделия со стабильными во времени выходными параметрами. Стабильность параметров изделий в данном случае во многом определяется временным дрейфом сопротивления тонкопленочных резисторов, входящих в конструкции микросхем. Для выяснения причин изменения свойств тонкопленочных резисторов представляют интерес исследования процессов, происходящих в них с течением времени [13, 18, 19].

Для того чтобы выяснить особенности механизма старения тонкопленочных резисторов из кермета марки К50-С, проведен анализ изменения их сопротивления. Резистивные пленки в ходе исследований наносили на ситалловые подложки методом термического напыления в вакууме $2,66 \cdot 10^{-3}$ Па. Диапазон сопротивлений тестовых структур, рисунок которых создавали фотолитографией, составлял 5...500 кОм. Свеженанпыленные и защищенные после формирования рисунка фоторезистом тонкопленочные элементы подвергались старению на воздухе при различных температурах. Измерение изменений сопротивления исследуемых резисторов проводили после каждых 100 ч их хранения.

Анализ результатов исследований [4–6, 11, 18–23] показал, что номинал тонкопленочных резисторов со временем возрастает и в течение 5000 ч для свеженанпыленных и незащищенных элементов отклоняется от исходного на 1,5...2 % при нормальной температуре старения. Наиболее высокой стабильностью отличаются резисторы, первоначально прошедшие тепловую обработку на воздухе, а впоследствии защищенные фоторезистом. Изменение их сопротивления в течение 5000 ч составляет 0,2...0,25 %.

Таким образом, полученные в результате анализа данные подтверждают, что временной дрейф сопротивления тонкопленочных резисторов обусловлен в основном окислением поверхности и объема резистивного слоя. Наименьшее изменение сопротивления с течением времени имеют структуры, у которых надежно защищена рабочая часть слоя. Полученные результаты позволяют выбрать метод и

оптимальные режимы формирования высокостабильных резистивных элементов из кермета марки K50-C, пригодных для создания специальных гибридных интегральных микросхем.

Параметрические отказы непроволочных переменных резисторов и методы определения влияющих факторов. Основными видами параметрических отказов непроволочных переменных резисторов (НПР) являются изменения переходного контактного сопротивления R_k подвижного контакта в динамике при выполнении функции регулирования [14, 17, 19, 24]. Возникающие при этом динамические флуктуации (ДФ) обусловлены определенными факторами, связанными прежде всего с наличием поверхностных дефектов ТПЭ и токосъемной щетки (ТСЩ), с неоднородностью проводимости композиционных материалов ТПЭ и ТСЩ, наличием вторичных структур и продуктов износа между ТПЭ и ТСЩ, влиянием различных механических факторов, включая возникновение фрикционных автоколебаний, и др. Концептуальная модель возникновения ДФ НПР позволяет получать их теоретические формы. Рассмотрение случаев перемещения ТСЩ по поверхности ТПЭ с дефектами типа пор и трещин, а также с вариациями проводимости из-за непроводящих включений композиции различной формы и размеров дает возможность построить теоретические кривые ДФ, отражающие зависимость их параметров от размеров и формы дефектов поверхности и проводящих свойств композиционных материалов ТПЭ и ТСЩ. Построение теоретических кривых ДФ напряжения на R_k выполняется при условии протекания постоянного тока. Отсюда в качестве модели ДФ можно принять импульсный случайный процесс (ИСП).

Анализ результатов экспериментальных исследований ДФ подтверждают теоретические построения и принятые модели. Осциллографирование ДФ напряжения на R_k позволило установить, что форма отдельных элементов ДФ как ИСП соответствует теоретическим кривым. Одновременно в качестве сигналов выявлены две составляющие ДФ, одна из которых представляет стационарный ИСП, а другая — нестационарный ИСП. В целом сигналы ДФ следует рассматривать как аддитивно-мультипликативную сумму этих составляющих, разделение которых может быть сделано на основе различий определенных параметров и свойств сигналов (амплитуда и форма импульсов, частотный диапазон и др.). Представляется возможным первую составляющую связать в основном с электрофизическими факторами, а вторую — с механико-кинетическими факторами.

Для определения диагностических признаков ДФ и установления возможности идентификации дефектов НПР по ДФ на поверхности ТПЭ проведено моделирование искусственных дефектов. В результате осциллографирования ДФ получены подтверждения непосредственной зависимости амплитуды и формы ДФ от геометрических

параметров искусственных дефектов. Хорошая различимость установлена для одиночных крупномасштабных неоднородностей ТПЭ. Однако следует отметить, что для выяснения возможности идентифицировать мелкомасштабные дефекты элементов НПР требуются дополнительные исследования.

Анализ результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований сигналов ДФ НПР позволяет утверждать, что по ДФ с привлечением диагностических признаков (параметров) сигналов можно проводить оценку технического состояния подвижного контакта НПР с выявлением основных причин их параметрических отказов в динамике при регулировании. В качестве диагностических признаков (параметров) параметрических отказов можно использовать амплитуду, число и длительность отдельных выбросов ДФ. При использовании модели ДФ как ИСП для количественных расчетов и анализа ДФ как носителя диагностической информации о параметрических отказах НПР форму отдельных выбросов, наличие в ДФ импульсных последовательностей определенной частоты и некоторые другие можно использовать в качестве метода выбросов, позволяющего устанавливать статистические параметры ДФ. В процессе исследований выявлена возможность идентификации некоторых факторов, влияющих на параметрические отказы НПР по контактированию, и наличие эффекта токовых режимов и режимов перемещения ТСЦ на статистические параметры ДФ.

Анализ методов физического прогнозирования отказов конденсаторов. Совершенствование технологии производства и новые разработки оксидно-полупроводниковых конденсаторов (ОПК) обусловили необходимость проведения частых длительных испытаний по контролю их надежности. Следовательно, разработка физических по возможности неразрушающих методов прогнозирования отказов или предельных состояний конденсаторов является актуальной задачей [25].

Вентильные металлы Ta и Nb являются хорошими геттерами, особенно при повышенной температуре. В процессе изготовления ОПК имеют место несколько высокотемпературных операций, в результате чего кислород из конденсаторного диэлектрика Ta_2O_5 или Nb_2O_5 диффундирует в металл: по толщине оксида устанавливается состояние кислородной недостаточности и градиент проводимости [4, 6, 17]. При этом возрастает роль второй обкладки — двуокиси марганца как поставщика недостающего кислорода. Пористый с сильно развитой поверхностью слой MnO_2 не обеспечивает сплошного контакта с диэлектриком, а реакция восстановления MnO_2 с выделением кислорода протекает при температуре более $450\text{ }^\circ\text{C}$, для чего требуются затраты энергии от внешнего источника. В этих условиях существенную роль должна играть влага или другая полярная жидкость с

высокой диэлектрической проницаемостью как емкостный мостик, перекрывающий поры, и как катализатор, снижающий работу выхода кислорода из MnO_2 при наложении поляризирующего напряжения. На основе этой гипотезы разработаны физические методы прогнозирования изменения основных параметров ОПК — емкости и тока утечки при длительном термоэлектрическом старении.

Метод замораживания конденсаторов. При охлаждении ОПК до отрицательных температур поставка кислорода из MnO_2 к месту локализации дефекта ограничена за счет торможения ионных процессов. В случае относительно крупного дефекта уменьшение электронного тока при охлаждении не будет компенсировать его увеличение за счет отсутствия барьерного слоя кислорода, что в результате приводит к общему росту тока и регистрации дефекта [25].

Основной причиной уменьшения емкости ОПК при замораживании является значительное уменьшение «катодной» емкости вследствие снижения диэлектрической проницаемости влаги в порах. Установлена тесная корреляционная связь между конденсаторами при охлаждении и длительной эксплуатации под термоэлектрической нагрузкой, во время которой содержание влаги внутри корпуса конденсаторов уменьшается, особенно если корпуса не герметизированы. Влага диффундирует через пористый слой уплотняющей смолы и после длительного термоэлектрического старения ОПК незначительно замораживается.

Метод вакуумирования с наложением напряжения обратной полярности. Извлечение влаги из пор анода путем вакуумирования негерметизированных конденсаторов оказывает более жесткое воздействие на торможение ионных процессов в двуокиси марганца по сравнению с замораживанием. Увеличение температуры выше точки кипения воды при данном вакууме и наложение напряжения обратной полярности усиливает действие вакуумирования за счет дополнительного отрыва молекул влаги из тонких капилляров в порах. Регистрируемое аномальное увеличение тока утечки определяет качество конденсатора, а изменение емкости прогнозирует предельную надежность при длительной эксплуатации.

Метод термообработки без поляризирующего напряжения или с напряжением обратной полярности. При термообработке герметизированных ОПК у отдельных образцов с грубыми дефектами наблюдается рост тока утечки за счет оттока кислорода из зоны дефекта (превалирование диффузии кислорода в металл над поступлением из MnO_2). Каталитическое действие влаги ослаблено хаотическим размещением ее молекул при отсутствии поляризирующего напряжения или противоположно направленным расположением диполей при обратной полярности. Термообработка при температуре,

превышающей максимальную рабочую, но кратковременно допустимой по физической структуре конденсатора, позволяет дополнительно регистрировать смещение внутренних металлических элементов, приводящее при длительной эксплуатации конденсатора к короткому замыканию. Экспериментально подтверждено неразрушающее действие предложенных методов, используемых в производстве при оценке технологических изменений в новых разработках.

Электрические поля как причина отказа керамических конденсаторов. При анализе полных отказов керамических малогабаритных конденсаторов монолитного и секционного типов установлено, что причиной таких отказов является электрический пробой керамики в местах резкой неоднородности электрического поля, в основном у торцевых краев электродов [24, 25]. Поэтому проведен расчет электростатических полей в соответствующих конструкциях с целью выбора размерных соотношений в конструкциях и выбора рабочего напряжения, обеспечивающего высокую надежность.

Электростатическое поле в конструкции описывается уравнением Лапласа для электростатического потенциала в области, определяемой геометрией конструкции, с граничными условиями для потенциала на металлических поверхностях и условиями ошибки потенциала и индукции на границах раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Расчеты поля проводят численно по программам, реализующим метод конечно-разностной аппроксимации уравнения Лапласа на прямоугольной сетке с кусочно-постоянным шагом с использованием итерационной схемы для решения системы разностных уравнений. В результате получали численные описания и визуализацию картины поля, локальные значения максимальной напряженности E_{\max} у края электрода, «кратности» поля $k = E_{\max} / E_0$ (где E_0 — напряженность однородного поля), а также объемы перегруженных частей диэлектрика вблизи локальных максимумов поля. Согласно зависимости экстремальных характеристик поля от геометрических соотношений в конструкциях (радиусы закруглений электродов, межэлектродные промежутки и т. д.) места локальной перенапряженности перемещаются при вариации размеров в однотипных конструкциях. В общем случае в конструкциях имеется не одно, а несколько слабых мест, вызванных дефектностью используемых материалов и особенностями технологии изготовления радиоэлемента, и для выбора размерных соотношений в таких случаях необходимо решать задачу оптимизации. Испытания конденсаторов на кратковременную электрическую прочность позволяют классифицировать типы пробоя по местам пробоя и подтверждают модель потери электрической прочности, что позволяет установить связи между параметрами функции распределения пробивных напряжений и степенью неоднородности поля.

Анализ термоупругих напряжений как причина механической деструкций и отказов высоковольтных высокочастотных керамических конденсаторов. Для высоковольтных высокочастотных керамических конденсаторов характерны электрические нагрузки, приводящие к мощностям тепловыделения и, соответственно, перегрева ν по отношению к окружающей среде, доходящего до сотен градусов Кельвина. Ввиду значительной скорости перепада температур между нагретой внутренней частью конденсатора и охлажденной его поверхностью возникают механические напряжения $\sigma \sim \alpha \Delta \nu$, приводящие к механической деструкции и отказу конденсаторов. В работе [25] рассчитаны нестационарные и стационарные температурные поля в конденсаторах дискового и цилиндрического типа, возникающие вследствие их механических напряжений, проведены испытания на долговечность и построены соответствующие модели. Мощности тепловыделения рассчитаны, исходя из эквивалентной схемы керамического конденсатора на частотах $10^4 \dots 10^6$ Гц. При решении уравнения теплопроводности граничные условия соответствуют принудительному воздушному и водяному охлаждению поверхностей дисков и цилиндров. Условия охлаждения учитывали при выборе эффективного коэффициента теплообмена поверхностей конденсатора со средой при разных скоростях обдува и различных теплоносителях. Решая уравнения теории упругости, по заданному неоднородному температурному полю рассчитаны распределения механических напряжений в системе. Согласно расчету, растягивающие напряжения, наиболее опасные для керамики в дисковом конденсаторе, в рассмотренных конструкциях присутствуют и могут превышать предел прочности, но их можно снижать, если применять принудительное охлаждение. Сжимающие напряжения в конденсаторе, имеющие форму полого цилиндра, могут превышать предел прочности для ряда режимов нагружения и геометрических соотношений в конструкциях.

Для выбранных конструкций был математически построен план эксперимента, позволяющий разработать модель долговечности конденсатора. В качестве отклика выступало время до разрушения t , а в качестве факторов — параметры электрического напряжения. По результатам эксперимента получены коэффициенты модели $t = A \exp(-\gamma \sigma_{\max})$, соответствующие термофлуктуационному механизму разрушения. С учетом зависимости параметров модели от геометрических размеров конденсаторов выбирают наиболее надежные конструкции. Полученные результаты использованы при оценке и прогнозировании $\gamma\%$ -ресурса исследуемых конденсаторов.

Необходимо отметить, что выход из строя керамических конденсаторов в подавляющем большинстве случаев обусловлен нарушением

электрической прочности (ЭП) их диэлектрика. Представляет практический интерес поиск характеристики, определяемой неразрушающим способом, которая бы несла информацию об ЭП образца. Керамика — неоднородный по составу материал. Воздействие на нее электрического поля приводит к возникновению в керамике областей с повышенным значением максимальной напряженности E_{\max} по отношению к значению средней напряженности $E_{\text{ср}}$ электрического поля. Причиной возникновения таких областей могут быть крупные и мелкие поры, макро- и микротрещины, проводящие включения, межкристаллическая прослойка, граница электрод—керамика. Наиболее вероятной причиной пробоя керамики при воздействии электрического поля являются ионизационные процессы, происходящие в крупных включениях (порах, макротрещинах и т. д.) и вблизи них. Ионизационные процессы развиваются в частичные разряды — местные резкие увеличения проводимости диэлектрика, пробой газовых включений и малых объемов диэлектрика.

Это объясняется тем, что в дефектах имеет место резкое увеличение значения E_{\max} по сравнению с величиной $E_{\text{ср}}$. Такого увеличения может достигать диэлектрическая проницаемость ε кристаллической фазы для пор, уплощенных в направлении, которое перпендикулярно действующему полю, и до полутора раз — для круглых пор. В результате в них возникают частичные разряды при значениях $E_{\text{ср}}$, весьма далеких от пробивных. Практически возникновение первых (начальных) частичных разрядов возможно при напряжении $u_{\text{н}}$, начиная с 250 В, тогда как рабочее напряжение конденсатора составляет несколько десятков киловольт. Энергия частичных разрядов затрачивается на ионизацию атомов материала, нагрев, излучение и расширение канала пробоя. В керамических конденсаторах ЭП зависит от вида напряжения (высокочастотное, низкочастотное, импульсное, постоянного тока). Наименьшее значение ЭП на высокочастотном напряжении по сравнению с другими видами напряжения обусловлено большей интенсивностью частичных разрядов. Практический интерес представляет прогнозирование работоспособности конденсаторов при их длительной работе. Для высокочастотных конденсаторов основной механизм отказа при длительной работе — выход из строя вследствие термоупругих напряжений [23], для низкочастотных — вследствие деструкции диэлектрика частичными разрядами [24–28].

Конденсатор способен работать бесконечно долго, если в его диэлектрике значение $u_{\text{н}}$ выше рабочего напряжения. Надежность конденсатора в случае значения $u_{\text{н}}$ менее рабочего напряжения зависит от развития или подавления ионизационных процессов, если выдерживать конденсаторы при величине рабочего напряжения. О степени снижения их ЭП можно судить по уменьшению значений $u_{\text{н}}$ и росту

кажущегося заряда q частичных разрядов. Конденсатор с таким изменением указанных характеристик отказывает в первые часы испытаний. Эти изменения характеристик свидетельствуют об укрупнении дефектов (рост трещин, соединение пор локальным каналом пробоя, возникновение каналов неполного пробоя и т. д.), внутри и вблизи которых происходят ионизационные процессы. Увеличение u_n и снижение q свидетельствует о подавлении частичных разрядов в дефектах, снижении влияния активной роли дефектов на ЭП. Такие конденсаторы способны работать безотказно в течение длительного периода времени.

Полученные при исследованиях результаты позволили заменить обычный метод определения надежности керамических низкочастотных конденсаторов высокого напряжения путем длительных испытаний неразрушающим методом контроля посредством измерения характеристик частичных разрядов. Наиболее информативной по отношению к длительной работоспособности конденсаторов оказался кажущийся заряд частичных разрядов. Для определения надежности конденсаторов таким образом требуется по 5...10 с на конденсатор. Проверка показала, что образцы конденсаторов, отбракованные при значениях $q \leq q_{кр}$, имеют вероятность безотказной работы не хуже 0,995 при достоверности 0,8.

Заключение. В статье проведен подробный анализ состояния и перспектив развития РЭА с точки зрения надежности. Параметры надежности РЭА систематизированы в зависимости от физических условий ее функционирования. Рассмотрены принципы построения моделей катастрофических и внезапных частичных отказов, основанных на представлении прибора рядом параллельно соединенных по входу и выходу ячеек, которые в свою очередь состоят из набора конструктивных элементов РЭА.

Изложены основы теории и практические методы определения, обеспечения и контроля надежности сложных систем. Рассмотрены модели и методы расчета показателей надежности при разработке технических требований, проектировании, конструкторской обработке, производстве и эксплуатации сложных технических систем РЛС. Сформулированы требования к исходным данным, приведены методы получения количественных оценок надежности, точности и достоверности при различных видах исходной информации. Приведены сравнительные оценки эффективности способов обеспечения надежности и даны технологические оценки по обеспечению надежности РЭА на всех стадиях создания и эксплуатации.

Материалы статьи способствуют изучению процессов, происходящих в отдельных системах, исследованию влияния нагрузок на работу систем, разработке методов учета различных факторов при

оценке надежности и др. Хотя разработанные в результате проведенных исследований методы и относились к изучению отдельных физических явлений, однако в некоторых простых случаях они позволяют решать задачу обеспечения надежности близкими к оптимальным методами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коненко Ю.К., Ушаков И.А. *Вопросы надежности радиоэлектронной аппаратуры при механических нагрузках*. Москва, Сов. радио, 1975, 144 с.
- [2] Малафеев С.И., Малафеева А.А. *Основы автоматики и систем автоматического управления*. Москва, ИЦ «Академия», 2010, 384 с.
- [3] Горюнов Н.Н. *Транзисторы. Полупроводниковые приборы. Справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 1985, 904 с.
- [4] Шанк Ф.А. *Структуры двойных сплавов*. Изд. 2-е, доп. Москва, Металлургия, 1973, 760 с.
- [5] Митчел Дж., Уилсон Д. *Поверхностные эффекты в полупроводниковых приборах, вызванные радиацией*. Москва, Атомиздат, 1970, 93 с.
- [6] Хансен М., Андерко К. *Структура двойных сплавов*. Москва, Metallurgizdat, 1962, 608 с.
- [7] Горюнов Н.Н. *Свойства полупроводниковых приборов при длительной работе и хранении*. Москва, Энергия, 1970, 103 с.
- [8] Ляшок А.П., Россошинский А.А., Шевченко Е.С. О причине отказов микросварных соединений золото—алюминий в интегральных схемах. *Электронная техника. Сер. 6. Микроэлектроника*, 1968, вып. 3, с. 74–79.
- [9] Колесников В.Г. (гл. ред.). Основные твердотельные приборы, используемые в электронных устройствах. *Электроника. Энциклопедический словарь*. Москва, Сов. энциклопедия, 1991, с. 7, 8, 528–530.
- [10] Окснер З.С. *Мощные полевые транзисторы и их применение*. Москва, Радио и связь, 1985, 288 с.
- [11] Ильинский А.В., Климов В.А., Ханин С.Д., Шадрин Е.Б. Электрические и оптические явления в диоксиде ванадия вблизи фазового перехода полупроводник—металл. *Известия РГПУ им. А.И. Герцена*, 2006, № 15. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/elektricheskie-i-opticheskie-yavleniya-v-dioksidge-vanadiya-vblizi-fazovogo-perehoda-poluprovodnik-metall> (дата обращения 03.07.2013).
- [12] Булгаков О.М. *Некоторые приложения декомпозиционных моделей мощных ВЧ и СВЧ транзисторов на основе изоморфно-коллективного подхода*. Воронеж, Воронежский гос. ун-т, 2006, 236 с.
- [13] Горлов М.И., Емельянов В.А., Строгонов А.Н. *Геронтология кремниевых интегральных схем*. Москва, Наука, 2004, 240 с.
- [14] Булгаков О.М., Никитина Ю.С., Петров С.А. Декомпозиционная модель катастрофического отказа мощного ВЧ (СВЧ) транзистора. *Вестник ВИ МВД России*, 2007, № 4. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/dekompozitsionnaya-model-katastroficheskogo-otkaza-moschnogo-vch-svch-tranzistora> (дата обращения 02.11.2013).
- [15] Рыжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г. *Основы теории надежности*. Ростов-на-Дону, ИЦ ДГТУ, 2002, 182 с.
- [16] Лупанов О.Б. О синтезе некоторых классов управляющих систем. *Сб. «Проблемы кибернетики»*, вып. 10. Москва, Физматгиз, 1963, с. 16–97.

- [17] Красулин Ю.Л., Назаров Г.В. *Микросварка давлением*. Москва, Металлургия, 1976, 160 с.
- [18] Зайцев А.А., Каменецкий Ю.А., Шибанов А.П. Влияние электростатических разрядов на транзисторы. *Полупроводниковые приборы и их применение*. Федотов Я.А. (ред.). Москва, Сов. радио, 1971, вып. 25, с. 441–462.
- [19] Федоров В.А., Сергеев Н.П., Кондрашин А.А. *Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств*. Москва, Техносфера, 2005, 502 с.
- [20] Епифанов Г.И. *Физические основы микроэлектроники*. Москва, Сов. радио, 1971, 376 с.
- [21] Рубаха Е.А., Синкевич В.Ф. *Механизмы отказов и надежность мощных СВЧ транзисторов*. Миллер Ю.Г. (ред.). Москва, Сов. радио, 1976, 320 с.
- [22] Козлов Б.А., Ушаков И.А. *Справочник по расчету надежности радиоэлектроники и автоматики*. Москва, Сов. радио, 1975, 472 с.
- [23] Перроте А.И., Карташов Г.Д., Цветков К.Н. *Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность*. Москва, Сов. радио, 1968, 224 с.
- [24] Алексанян И.Т., Вернер В.Д., Григорашвили Ю.Е. Модели диффузионных отказов термокомпрессионных соединений ИС. *Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*, 1979, вып. 4 (74), с. 5–7.
- [25] Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. *Электротехнические материалы*. Ленинград, Энергоиздат, 1985, 304 с.
- [26] Шишонок Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.А. *Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники*. Москва, Сов. радио, 1964, 551 с.
- [27] Животкевич И.Н. Создание методов оценки эксплуатационно-технических характеристик и испытаний бортового электронного оборудования авиационных систем на основе многоуровневой системы моделей. Ч. 2. Методы проведения ускоренных испытаний и синтеза характеристик отказоустойчивых систем. *Вестник Военного Регистра*, 2001, № 8, с. 11–19.
- [28] Райкин А.Л. *Элементы теории надежности для проектирования технических систем*. Москва, Сов. радио, 1967, 264 с.

Статья поступила в редакцию 05.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сидняев Н.И., Савченко В.П., Клочкова Д.В. Анализ физики отказов для оценки показателей надежности радиоэлектронных приборов современных радиолокационных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 12.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/appmath/hidden/1149.html>

Сидняев Николай Иванович родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1985 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 220 научных работ в области прикладной математики и механики. e-mail: sidnyaev@yandex.ru

Савченко Владимир Петрович родился в 1952 г., окончил ЛГУ им. А.А. Жданова в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор, генеральный директор ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца». Автор более 90 научных публикаций в области прикладной механики и радиотехники. e-mail: savchenko@rti-mints.ru

Клочкова Дарья Владимировна родилась в 1986 г., окончила МАИ в 2009 г. Аспирантка заочного отделения кафедры «Высшая математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, инженер-конструктор 1-й категории ОАО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца». Автор пяти научных публикаций в области прикладной механики и радиотехники. e-mail: dKlochkova@rti-mints.ru