

Деградационные процессы устройств микросистемной техники

М. С. Харламов, *contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

П. И. Дидык, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. А. Жуков, *д. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. П. Безмен, *к. т. н., contact@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Представлен обзор современных данных о деградационных процессах устройств микросистемной техники различных типов. Рассматривается влияние дестабилизирующих факторов на физику процессов старения типовых устройств микросистемной техники (МСТ). Особое внимание уделяется наиболее типичным и распространенным явлениям деградации, таким как влияние внутрикорпусной влаги и ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства. Рассматриваются различные источники активных летучих элементов внутрикорпусного пространства и методы снижения их количества в под-корпусной атмосфере. Проводится условное разделение влияния внешних и внутренних факторов на деградацию электрических и механических параметров чувствительных и исполнительных элементов устройств микросистемной техники. Предлагаются различные конструктивно-технологические методы увеличения показателей надежности на стадиях разработки и изготовления чувствительных и исполнительных элементов устройств микросистемной техники.

Ключевые слова: микросистемная техника, надежность, деградация, коррозионные процессы, радиационные воздействия

Degradation Processes of Devices of Microsystem Technology

M. S. Kharlamov, *contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

P. I. Didyk, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. A. Zhukov, *Dr. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. P. Bezmen, *Cand. Sci. (Engineering), contact@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. An overview of current data of the degradation processes of microsystem devices of various types is presented. The influence of destabilizing factors on the physics of the aging processes of typical microsystems devices is considered. Special attention is paid to the most typical and widespread phenomena of degradation, such as the effect of internal humidity and ionizing radiation of space. Various sources of active volatile components of internal elements and methods for reducing their quantity are considered. Conditional separation of the influence of external and internal factors on the degradation of electrical and mechanical parameters of sensors and actuators. Various design and technological methods for increasing reliability at the development and manufacturing stages of sensors and actuators are proposed.

Keywords: microsystem devices, reliability, degradation, corrosion processes, radiation effects

Приборы микросистемной техники переживают пик своего развития и расширения областей применения, включая космическую и военную отрасли, в которых к приборам предъявляются высокие требования по надежности и сроку активного существования (САС). Параметр надежности определяется двумя методами: проведением ускоренных испытаний (при повышенных параметрах: влажности, температуре, механической нагрузке, напряжении питания) и теоретическим прогнозированием и моделированием. Оба метода не являются взаимоисключающими, а, напротив, дополняют друг друга. Данные ускоренных испытаний являются наиболее полными и точными, однако требуют наличия рабочих образцов в необходимом количестве (для получения статистических данных), в то время как построение модели возможно на этапах разработки конструкции и технологии изготовления прибора.

Известно, что особенностью устройств микросистемной техники является наличие чувствительного или исполнительного элемента (ЧЭ, ИЭ), служащего преобразователем механических перемещений в электрический сигнал (датчик) и наоборот (актюатор) по различным физическим принципам (емкостные, магнитные, электростатические, пьезоэлектрические) в сочетании с управляющими устройствами на основе микроэлектронных приборов. Таким образом, надежность устройств микросистемной техники является производением надежностей управляющей микроэлектроники и ЧЭ/ИЭ. Изучение механизмов деградации микроэлектронных приборов — транзисторов, диодов — позволило создать полупроводниковые приборы с САС до 25 лет [1–4]. В то же время систематические данные по САС устройств микросистемной техники отсутствуют, что и обуславливает актуальность настоящей работы.

Целью работы является обзор данных о деграционных процессах и механизмах отказов чувствительных и исполнительных элементов устройств микросистемной техники.

Из анализа теоретических и практических подходов к прогнозированию надежности и САС устройств микросистемной техники следует, что необходимо учитывать весь комплекс взаимосвязанных процессов, протекающих в конструкционных материалах при их эксплуатации. В этой связи

в работе рассмотрены деграционные процессы механических, электрических параметров элементов МЭМС-прибора, радиационные и размерные эффекты.

Деграция механических параметров

В зависимости от конструкции и условий эксплуатации ЧЭ/ИЭ прибора испытывает различные виды деформации: изгиб, растяжение, сжатие, кручение, трение, касание (удар) двух элементов, циклические нагрузки, вибрационные и ударные. Одним из основных параметров актюаторов (СВЧ-реле, цифровые микрозеркальные устройства и другие) является количество циклов переключения, которое прибор должен выдержать без значительных изменений собственных характеристик. Анализ деградации МЭМС-переключателей подробно рассмотрен авторами [7–9]. Для контактных МЭМС-переключателей наблюдается точечная коррозия и задубливание металлических контактов в местах соприкосновения, что значительно уменьшает площадь контакта и, следовательно, увеличивает контактное сопротивление переключателя [7] (рис. 1). Для переключателей емкостного типа наиболее типичными являются эффекты залипания консоли в замкнутом положении и изменение напряжения переключения. Оба эффекта связаны с накоплением заряда в диэлектрических

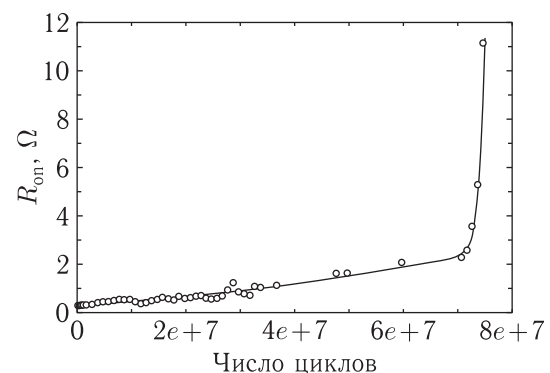


Рис. 1. Электрическое сопротивление МЭМС-переключателя с контактной областью из золота при токе 4 мА при варьированном числе циклов переключения [8]

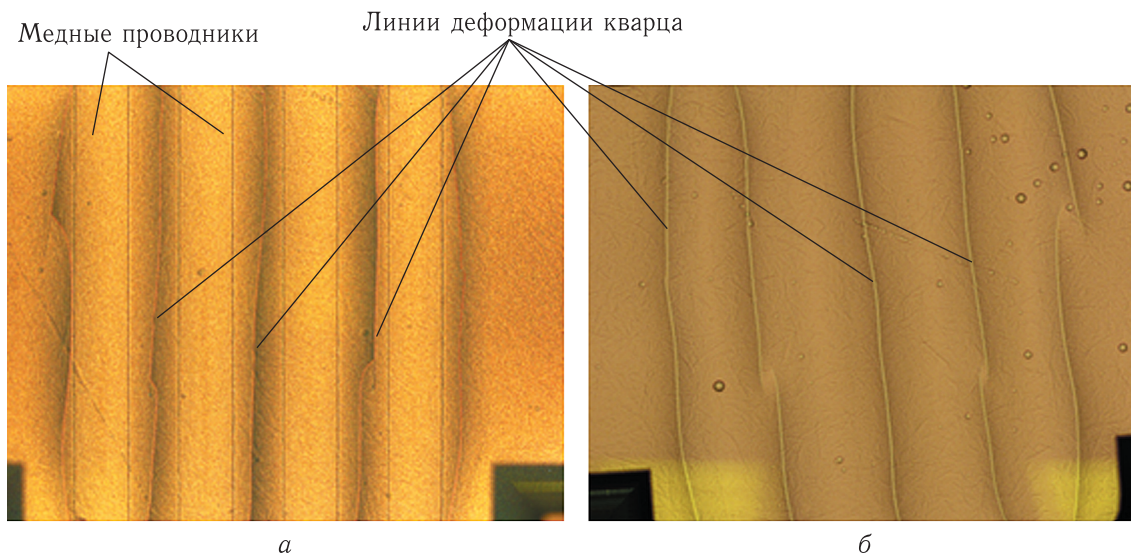


Рис. 2. Пластическая деформация поверхности кварцевой мембраны толщиной 20 мкм после формирования медных проводящих дорожек: а) — изображение с лицевой стороны мембраны с металлизацией; б) — изображение обратной стороны мембраны с металлизацией, увеличение 5х

слоях и на поверхностных состояниях из-за структурных нарушений.

Причиной всех вышеперечисленных процессов является образование дислокационных дефектов в структуре моно- и поликристаллической решетки материала переключателя при наличии механических напряжений, превышающих пороговое значение [5], так, для кремния эта величина составляет 10^5 – 10^6 Па [10].

Нагрузка на чувствительный элемент может быть вызвана не только механическим воздействием при эксплуатации, но и деформациями структуры при перепадах температур в случае адгезионного контакта материалов с различным ТКЛР. Деформация структуры чувствительного элемента может проявляться еще на стадии изготовления при использовании некоторых высокотемпературных процессов (осаждение диэлектриков, напыление металлов, «сухое» плазменное травление, бондинг) (рис. 2), что крайне негативно сказывается на характеристиках МЭМС-акселерометров, гироскопов, датчиков давления и прочих приборов и является актуальной проблемой для разработчиков и производителей некоторых датчиков [6].

Общая скорость деградации механических параметров во многом зависит от динамики перемещения дислокаций в объеме решетки, так как

стремление дислокаций к объединению приводит к появлению микротрещин и неупругой деформации кристалла. Автором [10] описан эффект динамического старения дислокационных дефектов в кремнии, вызванный закреплением и ограничением подвижности дислокаций из-за накопления примесных атомов. Таким образом, для улучшения механических свойств и прочностных характеристик чувствительных элементов может использоваться материал со специально введенными либо неконтролируемыми легирующими примесями [10].

Одним из наиболее перспективных методов повышения механической надежности является использование наноматериалов при формировании структур ЧЭ/ИЭ приборов МСТ. В целом наноматериалы обладают более высокими механическими характеристиками по сравнению с традиционными структурными материалами [15]. Это обусловлено возникновением размерных эффектов, проявляющихся в твердом теле с размером зерен порядка 100 нм, малым количеством структурных дефектов кристаллической решетки и низкой динамикой дислокаций.

На рис. 3 качественно проиллюстрированы преимущества наноструктурированных материалов перед крупнозернистыми [15]. Увеличение твердости при переходе размера зерен в нанометровый

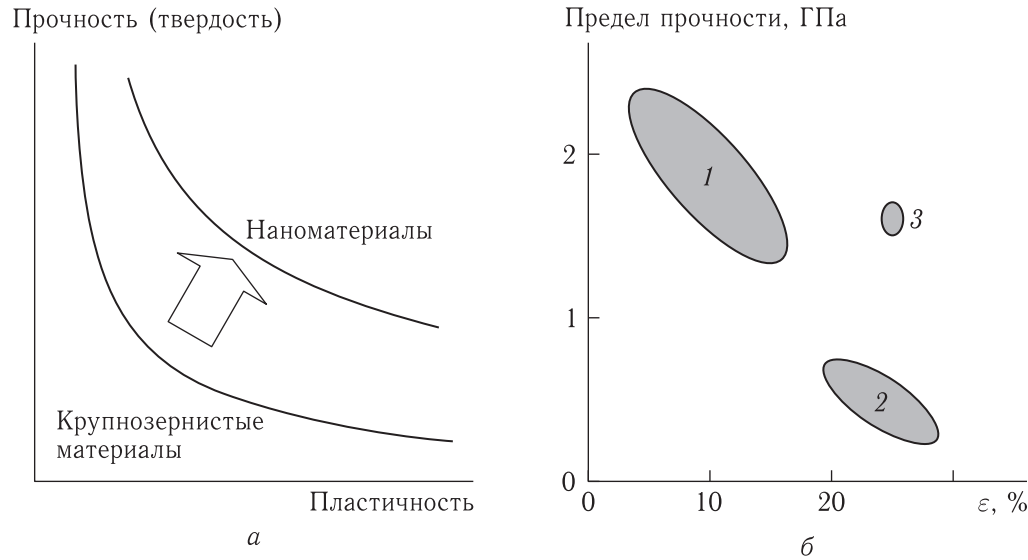


Рис. 3. Качественная связь между прочностью (твердостью) и пластичностью материалов (а) и соотношение предела прочности от относительного удлинения до разрушения для различных сталей (б): 1 — высокопрочные; 2 — низкоуглеродистые; 3 — нанокристаллические [15]

диапазон для металлов может составлять 500–600 %, а для хрупких материалов — до 300 %. Использование сверхрешеток и 2D-наноструктур также позволяет значительно повысить механическую надежность подвижных элементов, однако применение подобных материалов многократно повышает стоимость приборов из-за сложности изготовления.

Таким образом, вклад деградации механических параметров в общую надежность и САС прибора является отличительной особенностью устройств микросистемной техники. Старение вызвано ростом и объединением дислокационных дефектов при механической нагрузке на ЧЭ/ИЭ.

Деградация электрических параметров

Для описания деградации электрических параметров приборов МСТ можно использовать модели, применяемые в микроэлектронике. Основная проблема в применении этих моделей заключена в том, что необходимо рассматривать кинетику и физику деградационных процессов при наличии механических напряжений. Известно, что скорость коррозионных процессов зависит от состава атмосферы

подкорпусного пространства. Наличие летучих компонентов (углеводородов, галогенов и других) приводит к химическому окислению металлизации. Вода, помимо окислителя, выступает переносчиком соединений, в том числе органики, а повышенный уровень влажности может привести к образованию конденсата на поверхности кристалла и, как следствие, процессам электрохимической коррозии проводников.

Известно, что вода существует на внутренних поверхностях прибора в двух формах: адсорбированной пленки или конденсированных капель [16]. Толщина и площадь образовавшегося слоя зависит от свойств поверхности (шероховатость, смачиваемость), а также относительной влажности атмосферы подкорпусного пространства. При эксплуатации прибора при температуре ниже точки росы внутренние поверхности прибора покрываются каплями сконденсированной влаги (росы). Скорость коррозионных процессов зависит от особенностей топологии металлизации и состояния влаги на поверхности кристалла. В случае адсорбированной тонкой пленки, толщина которой не превышает нескольких монослоев, преимущественно наблюдается постепенное «старение» прибора, сопровождающееся медленной деградацией электрических параметров. При перекрытии же соседних

проводящих дорожек или контактных площадок конденсированной каплей, по данным [16], скорость электрохимической коррозии возрастает на 4–6 порядков, а также появляется большая вероятность возникновения короткого замыкания. В случае контакта разных металлов скорость коррозии зависит от значения контактной разности потенциалов, причем электрохимические реакции протекают при отсутствии внешнего напряжения.

В работе [17] описана кинетика электрохимической коррозии алюминиевой металлизации в интегральных схемах, однако указанная модель не учитывает скорость разрушения пассивирующих покрытий. В обычных атмосферных условиях алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью благодаря пассивирующей пленке Al_2O_3 толщиной 5–10 нм, однако наличие галогенов, особенно хлора, приводит к локальной коррозии, или питтингу. Высвобожденные ионы хлора продолжают участвовать в окислении алюминия, поэтому даже малое количество галогенов вызывает обширные повреждения металлизации [4].

Образование влаги на поверхностях подвижных частей ЧЭ/ИЭ может вызывать изменение частотно-механических характеристик конструкции, а также вызывать залипание подвижных контактов. При конденсации влаги в маленьких воздушных зазорах электростатических устройств происходит полный отказ из-за замыкания емкостей через воду.

Известно, что процесс электромиграции также оказывает большое влияние на деградационное старение и последующий отказ прибора. Локальное увеличение плотности тока возможно в местах утонения алюминиевой пленки, например в результате длительной коррозии вглубь металлизации или на углах ступеней. Образование углублений и трещин на поверхности полупроводника, вызванных электромиграцией, увеличивает общую площадь контакта металла с атмосферой подкорпусного пространства, что, в свою очередь, увеличивает общий объем и скорость глубинной коррозии, влекущей за собой локальное утонение проводника, рост плотности тока и дополнительный рост электромиграции ионов алюминия.

Для улучшения стойкости алюминия к электромиграции осуществляется добавка различных примесей при напылении металла [1]. Небольшое

количество кремния (до 1%) позволяет снизить показатели электромиграции, при этом электрическое сопротивление металлизации сильно зависит от массовой доли примеси. Увеличение стойкости может быть достигнуто в сплавах алюминия с различными металлами. Введение дополнительных слоев тугоплавких металлов также позволяет увеличить долговечность алюминиевых пленок. По данным [1], хорошую долговечность продемонстрировали пленки чистого алюминия с подслоем Ti-W.

Наилучшим решением проблемы электромиграции до сих пор остается подбор правильной ширины алюминиевых проводников по мере их размещения. Максимальной стойкостью обладают проводники, ширина которых меньше среднего размера зерна металла (приблизительно 1 мкм), так как в этом случае передвижение ионов в пустотах в направлении тока будет блокироваться материалом самих зерен.

Увеличение сопротивления между подвижным и неподвижным металлическими электродами, вызванное точечной коррозией и задубливанием, явным образом проявляется в МЭМС-переключателях контактного типа. Хотя механизмы данного явления сложны и находятся на стадии исследования, установлено, что деградационные процессы идут по двум параллельным направлениям:

- уменьшение эффективной контактной площади вследствие задубливания и точечной коррозии металла в месте контакта;

- локальный рост плотности тока, приводящий к электромиграции и микросварке электродов.

В некоторых типах устройств МСТ наиболее выражено проявляется деградационный процесс в диэлектрических слоях. В работе [7] описывается два процесса деградации маломощных емкостных ВЧ МЭМС-переключателей:

- увеличение напряжения активации и размыкание ключа из-за утечки заряда из кантилевера и накопления на поверхностных состояниях «металл–диэлектрик» и «диэлектрик–воздух»;

- инжекция заряда в диэлектрический слой из электрода, приводящие к залипанию кантилевера в нижнем положении.

Причиной этих деградационных процессов является увеличение плотности объемных и поверхностных ловушек в диэлектрике из-за роста

дислокационных дефектов, вызванных механическими нагрузками при замыкании ключа. Авторами [7] приводятся несколько методов решения проблемы зарядки диэлектрического слоя: модернизация конструкции прибора с использованием биполярной актюации, боковых управляющих электродов и других нетипичных конструкций.

Таким образом, деградация электрических параметров ЧЭ/ИЭ устройств МСТ базируется на тех же физических принципах, что и в традиционных микроэлектронных приборах. Однако при расчете кинетики требуется учитывать конструктивные особенности чипов и наличие механических нагрузок.

Источники летучих соединений

Известно, что состав летучих соединений подкорпусного пространства влияет на скорость коррозионных процессов металлизации приборов МСТ. Уровень содержания влаги в атмосфере подкорпусного пространства задается условиями герметизации. Она должна проходить в атмосфере инертного газа с содержанием влаги, не превышающей 50 ppm. Другими источниками влаги и летучих соединений являются внутренние поверхности корпуса: крышка, керамическое основание корпуса и адгезив, натекающие и диффундирующие газы из окружающей атмосферы. Уровень натекания определяется условиями и качеством герметизации и обычно хорошо контролируется. Исследование морфологии поверхности материалов металлокерамического корпуса и отвержденного адгезива обнаружило большое количество капиллярных каналов размером 0,2–3,9 мкм на поверхности отвержденного адгезива и развитую структуру керамического основания корпуса. По данным дифференциального термографического анализа (ДТА) керамики и отвержденного адгезива, были получены значения потери веса керамики (0,07 %) и клея (0,3 %) в результате десорбции воды из пор при нагревании до 150 °С и при этом отмечается рост поверхностного сопротивления керамики с 10^{14} Ом до 10^{15} Ом [12]. Показано [12], что термообработка перед герметизацией при температуре 150 °С не позволяет эффективно удалить влагу с поверхностей, так как расчетное давление внутри капилляра диаметром 200 нм

достигает до 1,4 МПа, что увеличивает температуру кипения воды в нем до 250 °С. Это ограничение по минимальной температуре отжига можно снять, если проводить термообработку в вакууме. Проведение термообработки ИК-отжигом с дополнительной откачкой позволило снизить содержание подкорпусной влаги до 0,01–0,2 об. %.

Клеевые соединения являются основным источником остаточных летучих элементов из-за повышенного газоотделения в вакууме, связанного с десорбцией и диффузией летучих компонентов из клеевых швов и продуктов реакций, протекающих в адгезиве. Кроме того, органические соединения, входящие в состав адгезива, хорошо абсорбируют атмосферную влагу еще до герметизации, а развитая пористая поверхность клеевого шва многократно увеличивает его открытую площадь и, как следствие, общий объем адсорбированной влаги. Состав и количество выделяемых летучих примесей зависит от исходного состава адгезива и различных технологических особенностей монтажа кристалла, например дополнительной термообработки клеевого шва. В работе [13] приводится обзор различных типов клеевых композитов, их сравнение по степени газовой выделения и элементному составу выделяемых летучих примесей. Термообработка отвержденного клеевого шва позволяет значительно уменьшить остаточное газовыделение: скорость диффузии летучих соединений при повышении температуры возрастает, и в течение сравнительно короткого времени концентрация этих компонентов в приповерхностном слое уменьшается.

Несмотря на обилие различных типов адгезивов, применяемых в микроэлектронной промышленности, нет прямых данных о составе и количестве остаточных летучих соединений, выделяемых после отверждения. В качестве косвенных параметров для сравнения степени газовой выделения различных составов клеев можно использовать значение массовой усадки клея и термостойкость. Использование геттера в составе сборки МЭМС-изделий способствует поддержанию низкого уровня концентрации активных газов в подкорпусном объеме, а также позволяет значительно снизить количество адсорбированной влаги на поверхности ЧЭ/ИЭ [23, 24].

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что улучшенные условия герметизации прибора

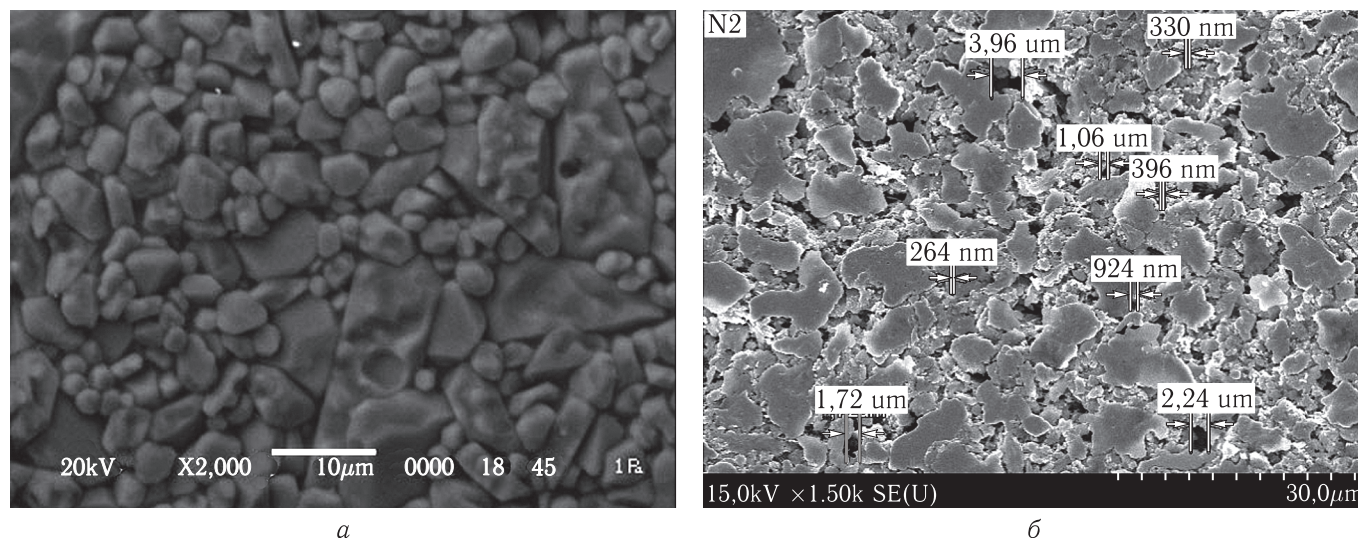


Рис. 4. Снимок с РЭМ внешнего вида поверхности керамического основания корпуса (а) и адгезива после сушки при 175 °С в течение 1 ч в среде азота (б) [12]

при сборке, а также предварительная сушка и использование геттера позволяют значительно увеличить надежность и САС прибора в целом.

Радиационные эффекты

Известно, что информация об уровнях радиационной стойкости устройств микросистемной техники ограничена, но среди имеющихся публикаций можно найти информацию о деградации особо чувствительных приборов при дозах порядка 100 крад [20]. По сравнению с приборами микроэлектроники изделия микросистемной техники обладают рядом отличительных конструктивных и функциональных особенностей, обусловленных различными принципами работы приборов, использующих разные физические эффекты для преобразования энергии (электростатические, электромагнитные, пьезоэлектрические, электротермические и пр.). При анализе деградационных процессов, вызванных космическим излучением, особый интерес представляют чувствительные и исполнительные элементы датчиков и актюаторов. Основными причинами трудности расчета и прогнозирования радиационной стойкости устройств МСТ являются многообразие используемых материалов (полупроводники, металлы, диэлектрики, полимеры) и различные физических принципы активации и преобразования.

В общем случае при воздействии ИИ на материал исполнительных и чувствительных элементов приборов МСТ образуются дефекты смещения и объемные ионизационные дефекты.

Дефекты смещения — структурные нарушения кристаллической решетки материала, обусловленные выбиванием атомов из узлов кристаллической решетки с образованием различных структурных дефектов (вакансии, межузлия, пары Френкеля, дислокации). Влияние дефектов смещения на параметры полупроводниковых материалов были изучены при анализе радиационной стойкости интегральных схем, центральным элементом которых является транзистор. Так, например, для кремния эти эффекты проявляются при облучении электронами с энергией от 1 МэВ.

Появление дефектов смещения сказывается на механических свойствах облучаемых материалов. Например, в работе [21] представлены данные об изменении микротвердости монокристаллического кремния под действием низкоинтенсивного β -излучения. Установлено, что пики разупрочнения (рис. 5) связаны с образованием комплексов структурных дефектов: V_2-O-C и/или V_2-O_2 (первый пик), V_2 и/или C_i-C_j (второй пик), здесь V — вакансия, O — атом кислорода, C_i и C_j — межузельный атом углерода и атом углерода, находящийся в узле кристаллической решетки соответственно. В той же работе показано влияние типа

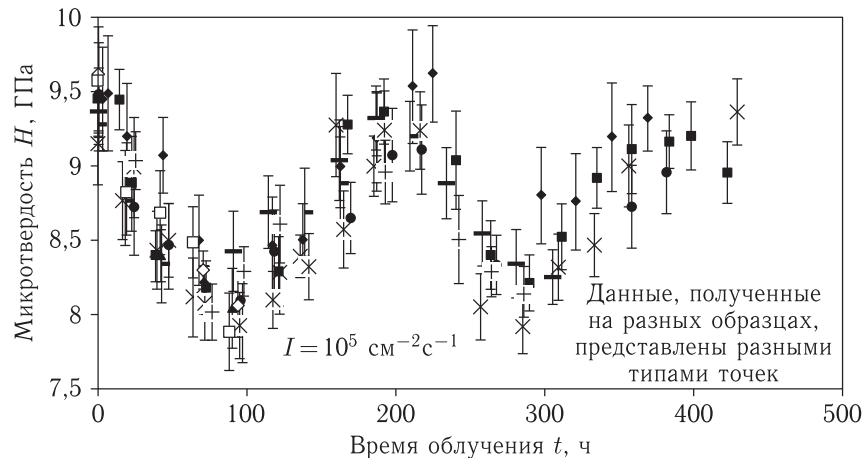


Рис. 5. Микротвердость монокристаллического кремния при варьируемом времени низкоинтенсивного β -излучения со средней энергией $E \approx 0,5$ МэВ [21]

и концентрации легирующей примеси на зависимость микротвердости от времени облучения.

Известно, что изменение модуля Юнга в условиях космического применения даже на самых высоких орбитах может не превышать нескольких десятков ррт в течение 10 лет. Такое изменение мало влияет на эксплуатационные характеристики низкочастотных датчиков, а также приборов, работающих в двух статических состояниях (ВЧ-переключатели, актюаторы), однако ряд высокочастотных приборов требует устойчивости в 10 ррт от резонансной частоты, которая пропорциональна квадратному корню модуля Юнга.

В металлах и диэлектриках из-за поликристаллической/аморфной структуры дефекты смещения, вызванные космическим ионизирующим излучением, практически не влияют на их параметры. Тем не менее в оптически прозрачных материалах структурные дефекты могут создавать паразитные центры рассеяния, приводящие к деградации некоторых МОЭМС устройств.

Большинство имеющихся экспериментальных данных и результатов моделирования о влиянии дефектов смещения на работоспособность изделий МСТ показывают, что структурные нарушения, вызывающие механическую и электрическую деградацию конструктивных материалов ЧЭ/ИЭ, наступают при дозах и плотности облучения, превышающих уровни радиационной стойкости более уязвимых к ИИ современных ИС и электронных компонентов.

Ионизационные дефекты возникают при передаче энергии от частицы или кванта ионизирующего излучения электронам кристаллической решетки полупроводника или диэлектрика, которые переходят в зону проводимости с созданием электронно-дырочной пары. Данный тип дефектов чаще всего становится причиной деградации и отказов устройств МСТ, так как гамма-излучение имеет большую глубину проникновения через материалы, что создает проблемы при создании эффективной защиты от его воздействия.

Наиболее пагубно ионизационные дефекты влияют на диэлектрические слои. Возникновение электронно-дырочных пар приводит к появлению электрически активных дефектов, что влечет за собой ухудшение изолирующих свойств и увеличение проводимости, вплоть до токовых утечек и пробоя. Кроме того, накопление захваченного заряда в диэлектриках и полупроводниках влияет на электрические характеристики МЭМС-приборов, имеющих емкостные элементы. По различным данным, деградация некоторых электростатических устройств МСТ в результате накопления заряда возникает при дозах от 30 крад.

Ионизационные дефекты могут проявляться не только в структуре кристалла. Например, для некоторых электростатических МЭМС-акселерометров и гироскопов, использующих гребенчатую структуру с малым зазором (порядка нескольких микрон), наблюдался эффект пробоя через емкостные элементы по вакууму ($\sim 10^{-4}$ Па) между

обкладками конденсатора, что приводило к отказу датчика, устранимому после снятия напряжения и перезарядки прибора.

Одним из наиболее эффективных методов увеличения радиационной стойкости устройств МСТ является корпусирование. Металлическая крышка корпуса экранирует большинство ионизирующих частиц, что на несколько порядков увеличивает требуемую дозу радиации, после которой начинают проявляться деградационные процессы в сенсоре или актуаторе. Однако это не позволяет полностью ликвидировать ионизационные дефекты и дефекты смещения, так как подобная защита очень слабо поглощает нейтроны и гамма-кванты. По уровню чувствительности к радиационному воздействию космического пространства МЭМС-устройства можно выстроить в следующий ряд:

электростатические $\Rightarrow$ пьезоэлектрические $\Rightarrow$
 $\Rightarrow$ электротермические $\Rightarrow$ магнитные.

В работе [22] приводится вариант анализа применимости имитационного моделирования для оценки радиационной стойкости приборов МСТ, а также предложена схема построения автоматизированного комплекса для радиационных исследований изделий.

Таким образом, проблема влияния ионизирующего космического излучения на надежность ЧЭ/ИЭ является в настоящее время актуальной проблемой и требует дополнительных исследований в области физики деградационных процессов, вызываемых эффектами смещения и накопления дозы. Отсутствие активных полупроводниковых объемов в большинстве типов устройств МСТ делает их стойкими к воздействию ИИ, однако для оценки радиационной стойкости требуется проведение дополнительных исследований по влиянию радиации на механические характеристики исполнительных и чувствительных элементов приборов.

Заключение

Немногочисленные данные по физике и механизмах типичных отказов устройств микросистемной техники позволяют сделать следующие выводы:

– механизмы механического старения и деградации исполнительных и чувствительных элемен-

тов устройств МСТ связаны со структурным несовершенством конструкционных материалов и рядом эффектов, соотносящихся с генерацией и перемещением дислокаций — ползучесть материалов, усталостные явления и пр.;

– деградация электрических параметров ЧЭ/ИЭ устройств МСТ базируется на тех же физических принципах, что и в традиционных микроэлектронных приборах. Однако при расчете кинетики требуется учитывать конструктивные особенности чипов и наличие механических нагрузок;

– старение и деградация ускоряются под действием активирующих процессов: температурных воздействий, радиации, повышенной влажности и механических нагрузок;

– деградация электропроводящих контактов, необходимых для преобразования электрической энергии в механическую, или наоборот, частотные характеристики зависят как от наличия подкорпусной влаги, так и от выделения химически активных летучих компонентов, приводящих к коррозионным процессам и выходу из строя устройства.

Список литературы

1. Строгонов А.В. Долговечность субмикронных БИС и ПЛИС // Микроэлектроника, 2005, т. 34, № 2. С. 138–158.
2. Горлов М.И., Емельянов В.А., Строгонов А.В. Геронтология кремниевых интегральных схем. М., 2004. 240 с.
3. Доценко Н.С., Соболев В.В. Долговечность элементов радиоэлектронной аппаратуры (влияние влаги). СПб., 1973. 160 с.
4. Горлов М.И., Данилин Н.С. Физические основы надежности интегральных схем. М., 2008. 404 с.
5. Адарчин С.А. Деградация микроэлектромеханических структур измерительных тензопреобразователей датчиков давления. Дисс... к. т. н. Калуга, 2003.
6. Сео Дж. Б. Оптимизация параметров и моделирование рабочих режимов в компенсационных акселерометрах типа q-flexSi-flex. Дисс... к. т. н. Москва, 2012.
7. Лагош А.В., Корляков А.В. Механизмы деградации ВЧ МЭМС-ключей // Нано- и микросистемная техника, 2016, т. 18, № 5. С. 316–325.

8. *Mihailovich R.E. and DeNatale J.* Personal communications. Agoura Hills: Rockwell Scientific, 2001.
9. *Rebeiz G.M.* RF MEMS theory, design, and technology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.
10. *Петухов Б.В.* Различные типы динамики дислокаций как следствие их динамического старения // Журнал технической физики, 2003, т. 73, вып. 7. С. 82–87.
11. *Матвеев В.А., Лукин Б.С., Басараб М.А., Захарян Р.А.* Газопоглотители для вибрационных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2013, № 2. С. 90–99.
12. *Солодуха В.А., Турцевич А.С., Рубцевич И.И., Соловьев Я.А., Керенцев А.Ф., Довженко А.А., Самцов Е.П.* Обеспечение надежности интегральных схем на стадии производства // Современные информационные и электронные технологии, 2013. С. 8–11.
13. *Захарян Р.А.* Клеевые соединения в электронных и электронно-механических приборах. Дисс... к. т. н. Таруса, 2014.
14. *Zhao P., Pecht M.* Field failure due to creep corrosion on components with palladium pre-plated lead-frames // Microelectronics Reliability, 2003, 43. P. 775–783.
15. *Новиков Л.С., Воронина Е.Н.* Перспективы применения наноматериалов в космической технике. Учеб. пособие. М.: Университетская книга, 2008. 188 с.
16. *Волков С.И., Григорашвили Ю.Е., Полякова У.В.* Моделирование коррозионных отказов интегральных схем // Электронная техника, Сер. «Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания», 1981. С. 24–27.
17. *Русанова А.Л.* Исследование кинетики коррозии металлизации и разработка модели времени до отказа ИС // Электронная техника, Сер. «Упр. качеством, стандартизация, метрология, испытания», 1983, вып. 2. С. 65–70.
18. *Адарчин С.А.* Дegradaция микроэлектромеханических структур измерительных тензопреобразователей датчиков давления. Дисс. к. т. н. Калуга, 2003.
19. *Петухов Б.В.* Различные типы динамики дислокаций как следствие их динамического старения // Журнал технической физики, 2003, т. 73, вып. 7. С. 82–87.
20. *Данилин Н.С., Димитров Д.М., Сабиров И.Х.* Инновационные космические микросистемы в корпусе. М., 2011. 72 с.
21. *Дмитриевский А.А.* Механические свойства кремния в условиях низкоинтенсивных воздействий // Вестник ТГУ, 2009, т. 14, вып. 6.
22. *Артамонов А.С., Бойченко Д.В., Никифоров А.Ю., Согоян А.В., Телец В.А., Яшанин И.Б.* Особенности экспериментальных исследований доминирующих механизмов деградации параметров функциональных узлов изделий микросистемной техники при радиационных воздействиях // Авиакосмическое приборостроение, 2010, № 12. С. 13–17.
23. Патент 2439739 С1 (РФ) МПК7 H01K1/56. Нанокompозитная газопоглощающая структура / С.П. Тимошенков, Д.С. Гаев, А.Н. Бойко. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МИЭТ» (МИЭТ). № 20100148881. Заявл. 01.12.2010; опубл. 01.10.2012.
24. *Зубков Н.П., Пелипец О.В., Бобырь Н.П., Спицын А.В., Касимцев А.В.* Сорбционные и механические характеристики титан-ванадиевых геттеров // Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника, 2013, вып. 4(519). С. 154–161.