

Особенности оценки радиационной стойкости изделий МЭМС

А.С. Артамонов^{1,2}, Д.В. Бойченко^{1,2}, А.В. Сокоян^{1,2}, В.А. Харитонов³, А.И. Чумаков^{1,2},
И.Б. Яшанин⁴

¹ОАО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва

²Институт экстремальной прикладной электроники НИЯУ МИФИ, г. Москва

³Госкорпорация «Росатом», г. Москва

⁴ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е.Седакова», г. Нижний Новгород

Проведен анализ возможных радиационных эффектов в изделиях МЭМС с учетом особенностей конструкции, применяемых материалов, взаимодействия с ионизирующим излучением. Выделены потенциально чувствительные элементы и структуры, проведено моделирование радиационно-обусловленных процессов в типовых структурах МЭМС. Проведены экспериментальные исследования тестовых кристаллов датчиков давления и микроприводов. Показаны высокие уровни радиационной стойкости тестовых структур.

Вступление. Развитие технологии микроэлектроники привело к созданию принципиально новой базы РЭА. К ней относятся микроэлектромеханические системы (МЭМС) – интегрированные микроустройства, комбинирующие электрические и механические компоненты, изготовленные по технологиям, совместимым с технологией интегральных схем и имеющие размеры от микрометров до миллиметров. К перспективным образцам МЭМС следует отнести: реализованные на едином кристалле средства обработки информации, датчики (температуры, давления, ускорения, гироскопы и т.п.) и исполнительные устройства (микродвигатели, форсунки и т.п.); микросхемы с многослойной металлизацией, с включением элементов на основе поликремния и контактных областей на основе силицидов различных металлов; элементы памяти, изготовленные с использованием нанотехнологий и функционирующие на основе квантово-механических эффектов.

Микросистемные технологии по сравнению с традиционными технологиями микроэлектроники имеют ряд существенных особенностей:

- это технологии массового производства все более сложных приборов и устройств, обеспечивающие повышение надежности и относительное снижение стоимости;

- это междисциплинарные технологии, которые позволяют объединить в одном приборе ранее не связанные технологии, относящиеся к микроэлектронике и механике, микроэлектронике и химии и др.;
- это технологии, которые обеспечивают производство систем и структур с характеристическими размерами порядка микрометра и которые не могли быть реализованы существовавшими до настоящего времени методами.

По принципу действия изделия микросистемной техники (МСТ) подразделяют на электромеханические, оптоэлектромеханические, теплофизические, флюидные, биотехнические. В рамках одного принципа действия может быть реализовано несколько физических эффектов, например, к электромеханическому принципу относятся емкостной, пьезорезистивный, пьезо- и сегнетоэлектрический, электромагнитный, оптический, туннельный эффекты, на основе которых могут быть сконструированы изделия МСТ.

Радиационные эффекты. На сегодняшний день информация об уровнях радиационной стойкости микроэлектромеханических систем ограничена. Формирование отказов в значительной степени обусловлено малоизученными физическими процессами. Поэтому традиционная методология оценки радиационной стойкости узлов и блоков РЭА, основанная на оценках усредненной величины поглощенной энергии в чувствительном объеме при многих актах взаимодействия, оказывается некорректной. Соответственно, актуальной задачей является создание методов оценки радиационной стойкости высокоинтегрированных узлов аппаратуры, в которых совместно применяются изделия МЭМС, нано и микроэлектроники, а также подобной РЭА в целом. Специфика радиационных эффектов в изделиях МЭМС определяется, в первую очередь, конструкцией и технологией изготовления систем. Это обстоятельство определяет важность анализа базовых технологий изготовления элементов МСТ [1].

Анализ позволяет выделить три группы элементов в изделиях МЭМС, которые могут иметь принципиально различные механизмы радиационной деградации:

- узлы преобразования электрического сигнала, т.е., аналоговые и цифровые системы, выполненные по классической микроэлектронной технологии: устройства коммутации и нормализации сигналов, вторичные преобразователи информации, средства обработки информации, устройства обрамления, вывода и распределения сигналов и т.д.;
- чувствительные элементы - преобразователи физических величин и компонентов датчиков (первичные преобразователи информации);
- функциональные исполнительные элементы МСТ: микромеханические (микро-электро-, микрооптоэлектро-, микроопто-, микро-акустомеханические) устройства и их узлы (микро-размерные двигатели, элементы гидравлики, сопла, поршни, захваты, зацепы, редукторы,

шестерни, зеркала, приводы, оконечные силовые устройства и пр.), технологически и конструктивно выполненные с применением базовых и модифицированных процессов и операций микро- и оптоэлектроники, функциональной электроники (пьезо-, акусто- и др.).

Эффекты смещения (дефектообразования), вызываемые действием корпускулярного (преимущественно, нейтронного) излучения способны вызвать деградацию параметров элементов МСТ за счет действия нескольких базовых механизмов:

- увеличение проводимости изолирующего окисла вследствие накопления структурных повреждений;
- изменения проводимости полупроводниковых областей, в частности, увеличение сопротивления поликремния;
- изменение параметров пьезорезистивных и пьезоэлектрических материалов, констант пьезо- и пирозэффектов первого и второго рода.

Анализ результатов моделирования, анализ экспериментальных данных из литературных источников, показывает, что влияние эффектов смещения на работоспособность основных используемых в аппаратуре специального назначения типов исполнительных элементов МЭМС ожидается при флюенсах более 10^{15} н/см², что заметно превышает уровни стойкости современных ИС и электронных компонентов МЭМС.

Поверхностные ионизационные эффекты, вызываемые накоплением дозы под действием ИИ, способны вызвать деградацию параметров элементов МЭМС по нескольким механизмам:

- увеличение проводимости диэлектрических слоев;
- формирование радиационно-индуцированного заряда в диэлектрических структурах и изменение проводимости прилегающих к ним слоев полупроводника;
- изменение электростатического режима работы элементов МСТ за счет заряжения диэлектрика;
- изменение электрофизических свойств пьезорезистивных и пьезоэлектрических материалов, констант пьезо- и пирозэффектов.

Воздействие ионизирующих излучений может приводить к возникновению в диэлектриках заряженных дефектов и увеличению проводимости диэлектрических слоев, выполненных на основе Al_2O_3 , SiO_2 , PZT и ряда других керамических материалов, широко применяемых для изготовления исполнительных элементов МЭМС. Вместе с тем, как показывают экспериментальные исследования, эффект становится значимым при уровнях доз более 10^8 рад, что существенно превышает уровень стойкости полупроводниковых приборов.

Более существенное влияние на работу элементов МЭМС может оказать накопление заряда в диэлектрике при стационарном облучении, наиболее активно проявляющееся в областях с высокой напряженностью электрического поля (микродвигатели). С другой стороны, влияние этого эффекта будет ограничено экранирующим действием прилегающих полупроводниковых слоев.

Пьезо – и пирозлектрические свойства рабочего вещества пьезоэлектрических МЭМС могут изменяться под действием накопленной дозы ионизирующего излучения (ИИ). Радиационное поведение таких элементов МСТ существенно зависит от типа материала и технологии изготовления. Ряд эффектов в пьезоэлектрических преобразователях (дисторсия кривой гистерезиса) наблюдались при уровнях воздействия ниже 10^6 рад [Si]. Таким образом, эффекты поглощенной дозы могут быть значимыми в пьезоэлектрических элементах МСТ и должны учитываться при определении состава испытаний при уровнях воздействия выше 10^5 рад [Si] [2].

Объемные ионизационные эффекты в полупроводниковых приборах вызываются кратковременной ионизацией активных объемов импульсами ИИ высокой интенсивности. Отсутствие активных полупроводниковых объемов в элементах МЭМС должно, по идее, обеспечить их высокую стойкость к данному фактору. Однако при анализе поведения элементов преобразователей механических величин (ПМВ) следует учитывать такие эффекты как:

- эмиссия электронов из элементов приборов при воздействии импульса ИИ;
- наведенная (индуцированная) проводимость диэлектрических областей.

Эмиссия электронов при воздействии рентгеновского и гамма-излучений связана с механизмом передачи энергии от излучения к веществу. Вблизи поверхности материала электронное равновесие нарушается, и возникает нескомпенсированный ток эмиссии первичных электронов, вызывающий, в частности, появление внутреннего ЭМИ. Если вблизи эмитирующей поверхности находится диэлектрик, то процесс релаксации замедляется.

Другим фактором, который может ограничить стойкость ПМВ к импульсу ИИ является наведенная (индуцированная) проводимость диэлектрических областей. Во время воздействия импульса ИИ происходит интенсивная ионизация изолирующих диэлектрических областей, что приводит к появлению их наведенной фотопроводимости, и протеканию токов.

Сложность конструкции МСТ и наличие широкого спектра материалов могут приводить к резкой неоднородности энерговыделения в объеме элемента, что, в свою очередь, может сопровождаться развитием абляционных, ударных и термомеханических волновых процессов, существенно влияющих на импульсную реакцию элемента МСТ.

Отдельное место занимает анализ импульсной реакции элементов МСТ на основе пьезоэлектрических материалов. Как указывалось выше, широкий класс датчиков и актюаторов, яв-

ляющихся элементами микросистемной техники, составляют пьезо – и пирозлектрические преобразователи. Анализ импульсной реакции таких преобразователей в общем случае представляет собой чрезвычайно сложную задачу ввиду значительного количества физических процессов в пирозлектриках, протекающих при воздействии ИИИ.

Особенностью МЭМС пьезорезистивного типа (в частности, на кремниевых и карбид-кремниевых структурах) с точки зрения стойкости к объемным ионизационным эффектам является наличие в них активных областей (p-n переходы и т.д.), в которых возможно протекание ионизационных токов в десятки миллиампер при мощности дозы в интервале $10^{10} \dots 10^{11}$ рад(Si)/с. Элементы первичных преобразователей этих типов строятся в рамках стандартной микроэлектронной технологии, однако расположены первыми в измерительной цепи, и небольшое отклонение их выходного сигнала может привести к существенным ошибкам и искажениям сигнала измерительной информации [3].

Моделирование. Из анализа базовых технологий и структур МСТ следует, что в исполнительных элементах МЭМС ключевую роль будут играть эффекты, возникающие при воздействии импульсного гамма и особенно СЖР излучения. Это объясняется, с одной стороны, наличием в составе МЭМС материалов с большими атомными номерами, а с другой – использованием в ряде конструкций МЭМС термомеханического принципа перемещения.

Биметаллические балки широко используется в составе исполнительных элементов МЭМС. В последние годы МЭМС на основе биметаллических элементов также активно применяются в составе матричных ИК-фотоприемников. На рис. 2 изображена ячейка с одной пластиной, а на рис. 3 – ее расчетная геометрия для системы FEMLAB.

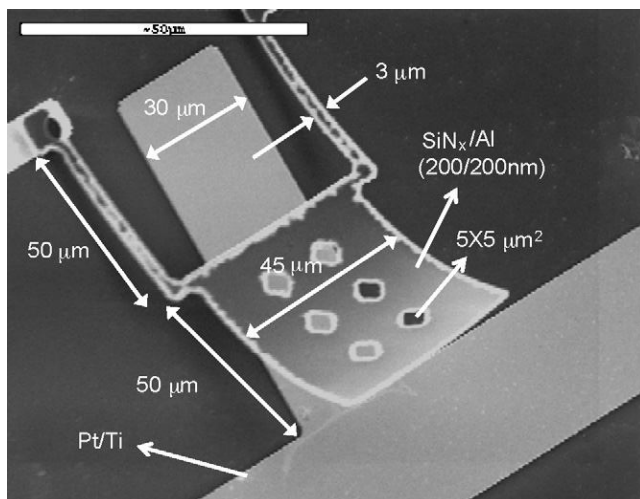


Рис. 2 - Изображение ячейки МЭМС ИК - фотоприемника

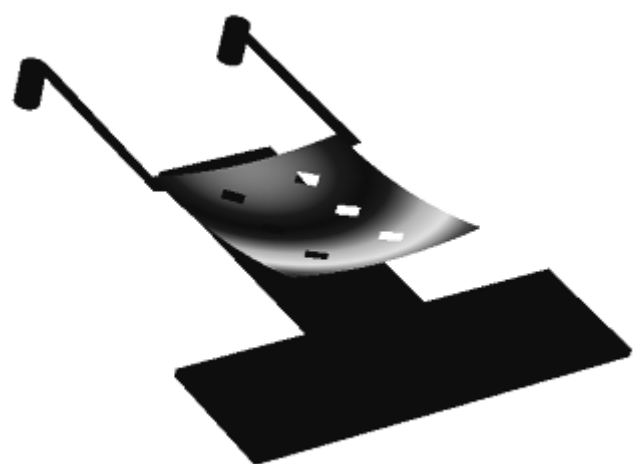


Рис. 3 Расчетная модель ячейки МЭМС ИК - фотоприемника

На первом этапе рассчитывалось энерговыделение в элементах микроактюатора при различных уровнях воздействия с использованием системы GEANT. На втором этапе проводилось моделирование нестационарных термомеханических процессов в системе FEMLAB. Актюатор предполагался размещенным на подложке из нитрида кремния толщиной 300 мкм и помещенным в воздушную среду. Ввиду высокой инерционности механической реакции системы по

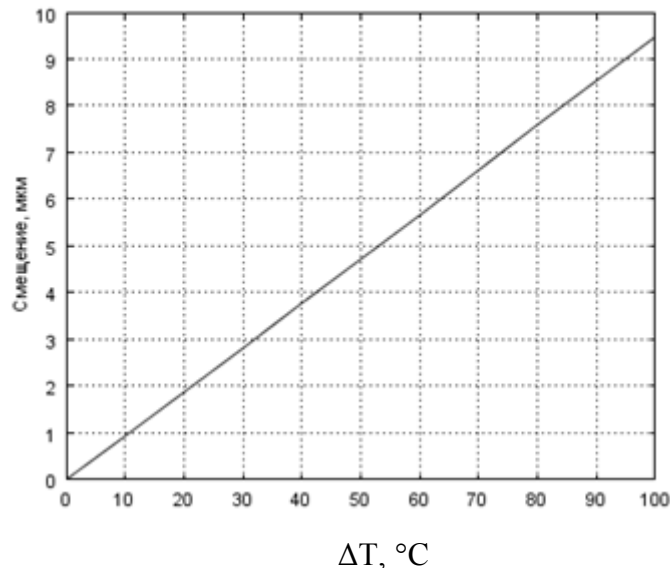


Рис. 4 – Зависимость максимального смещения пластины от приращения ее температуры

и характерным временем термализации носителей взаимодействие между электронной и ионной подсистемами при релаксации энергии излучения не рассматривалось. Термодинамические параметры материалов принимались изотропными. Рассмотрение проводилось в предположении отсутствия процессов модификации свойств мишени, испарения, абляции, появления дополнительных каналов рассеяния электронов в плазме свободных носителей и т.д. Расчет проводился путем совместного решения трехмерных нестационарных уравнений теплопроводности и упругости с учетом вклада линейного температурного расширения.

В нормальных условиях (без воздействия ИИ) максимальное смещение пластины зависит от приращения ее температуры (рис. 4). Для теплопроводности и теплоемкости использовалась библиотечная зависимость значений от температуры.

Анализ показывает, что основными эффектами при воздействии импульсного ИИ с уровнями до 10^{13} рад/с будут являться: ионизация материала элемента, ионизация воздушного зазора между нижней обкладкой (Pt/Ti) и пластиной, радиационный нагрев элементов конструкции.

На рисунке 5 показано распределение температур в МЭМС после воздействия импульса гамма-излучения с поглощенной дозой 1 Мрад [Si]. Существенное различие мгновенных температур между элементами обусловлено в случае гамма-воздействия величинами теплоемкости. При воздействии СЖР-излучения за счет увеличения поглощенной дозы в платине по сравнению с нитридом кремния максимальная температура превышает 800°C после воздействия и 600°C спустя 1 мкс (рис.6). Из-за малой величины воздушного зазора сопротивление теплопередачи между обкладкой и пластиной оказывается незначительным. При этом реакция системы в целом будет определяться не самым чувствительным биметаллическим элементом (повыше-

сравнению с длительностью импульса и характерным временем термализации носителей взаимодействие между электронной и ионной подсистемами при релаксации энергии излучения не рассматривалось. Термодинамические параметры материалов принимались изотропными. Рассмотрение проводилось в предположении отсутствия процессов модификации свойств мишени, испарения, абляции, появления дополнительных каналов рассеяния электронов в плазме свободных носителей и т.д.

ние его температуры составляет менее 20°C), а теплообменом платиновой обкладки с подложкой и средой. При столь значительных уровнях нагрева выход МЭМС из строя возможен из-за значительной температурной деформации элементов.

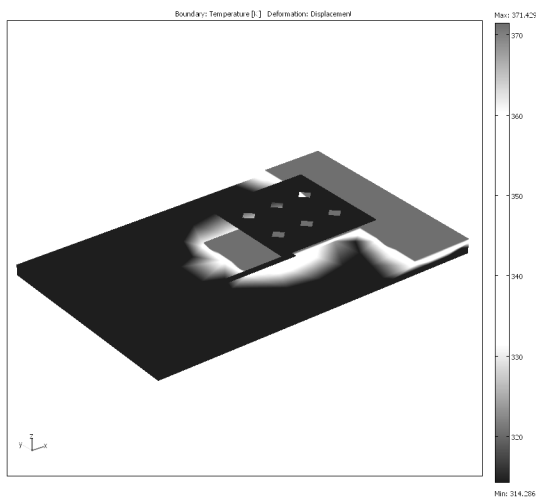


Рис. 5 - Распределение температур в МЭМС ИК-фотоприемника после воздействия импульса гамма-излучения с поглощенной дозой 1 Мрад [Si]

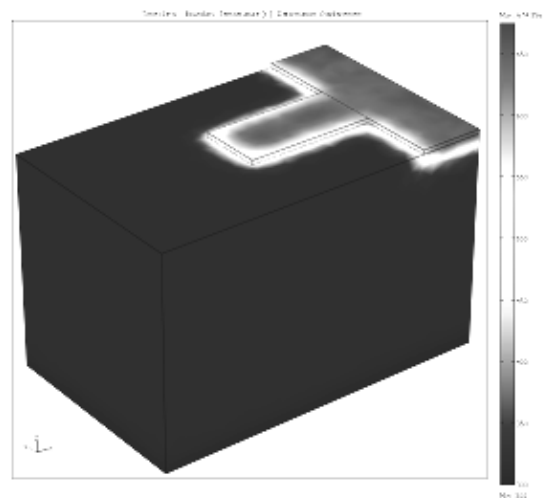


Рис. 6 - Распределение температуры в подложке ИК-фотоприемника спустя 1 мкс после импульса СЖР-излучения дозой 1 Мрад [Si]

Время постимпульсной механической релаксации исполнительных элементов МСТ, определяемое тепловой и механической инерцией приборов, может достигать значительных величин. Вид биметаллического (золото-поликремний) микроактюатора другой конструкции приведен на рис. 7.

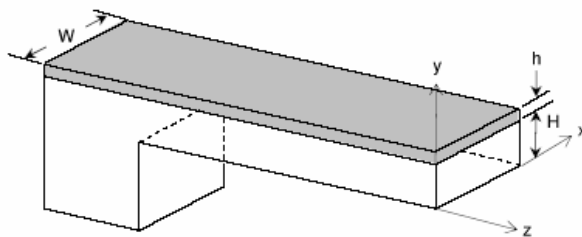


Рис. 7 - Вид МЭМС электротеплового биметаллического микроактюатора (модельная геометрия)

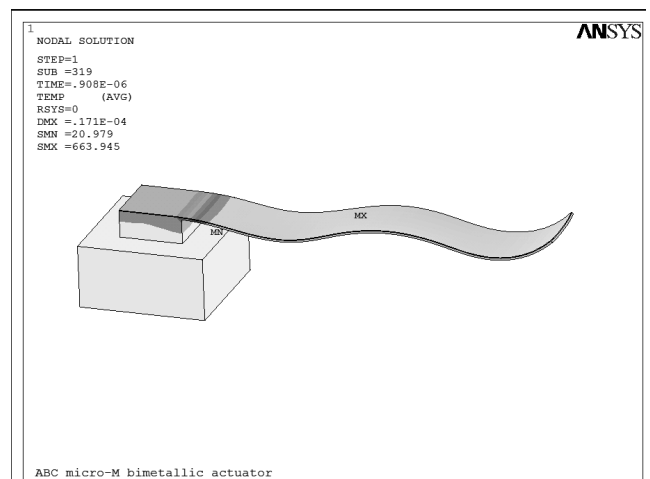


Рис. 8 - Геометрия МЭМС электротеплового биметаллического микроактюатора в момент времени 1 мкс после воздействия импульса СЖР-излучения

В процессе моделирования реакции актюатора предполагалось, что начальное механическое напряжение, обусловленное технологическими факторами, отсутствует. На начальном этапе в силу инерционности термомеханических процессов наблюдается запаздывание уровня деформации балки относительно эволюции температуры системы. При малых временах релаксация напряжения и уменьшение деформации балки обусловлено выравниванием температур золотой пленки, балки и подложки. При больших временах снижение деформации связано с остыванием

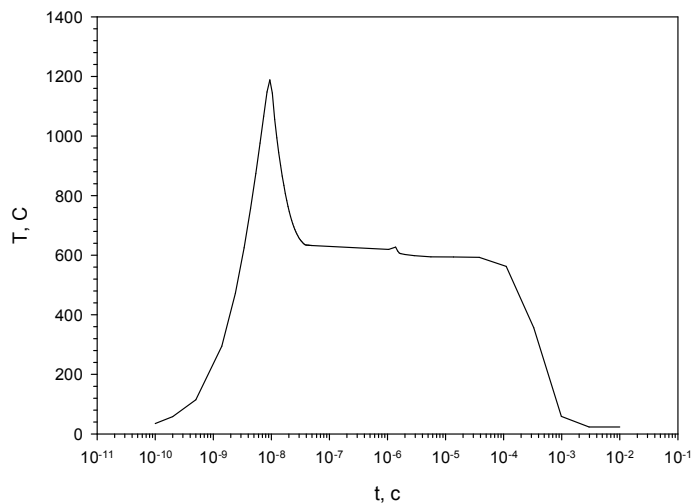


Рис. 9 - Зависимость максимальной температуры от времени после воздействия импульса СЖР-излучения

подложки в воздушной среде. Наличие подложки приводит как к затягиванию процесса охлаждения конструкции и увеличению инерционности отклика, так и к снижению амплитуды смещения балки.

При воздействии импульса СЖР-излучения картина оказывается существенно иной.

Температура золотой пленки после воздействия импульса излучения длительностью 10 нс превышает 1000⁰С. В результате возникают значительные деформации МЭМС и происходит возбуждение различных мод колебаний. На рис. 8 показана геометрия балки в момент времени 1 мкс после воздействия. Видно, что смещения точек элемента достигают 20 мкм. Длительность времени потери работоспособности определяется диссипацией энергии колебательного процесса и термической релаксацией системы (рис. 9).

Экспериментальные результаты. Объектом исследований являлись тестовые кристаллы (ТК) первичных преобразователей давления 5У2566, разработанные и изготовленные в рамках НИР «Маршрут-МСТ» в ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е.Седакова» (г. Н.Новгород).

Принцип действия датчика давления заключается в преобразовании давления, испытываемого чувствительным элементом (мембраной), в электрический сигнал. Основой конструкции первичного преобразователя давления является поликремниевая микромеханическая структура мембранного типа, формируемая с помощью технологии поверхностной микромеханики. Кристалл включает преобразователи абсолютного и избыточного давления с размером мембраны 50, 75 и 100 мкм, элементы для оценки чувствительности датчиков при давлении 0 и 1 атм. с размерами мембраны 75 и 100 мкм, тестовые элементы для оценки и измерения поверхностного сопротивления поликремния, тестовый элемент для измерения сопротивления контакта металл-

поликремний и элемент, предназначенный для разгерметизации датчиков избыточного давления при резке пластины на кристаллы.

На рис. 10 приведены типовые осциллограммы отклика выходного напряжения и напряжения разбаланса при $P=100$ кПа датчиков давления при уровнях воздействия импульсного ИИ $1,5 \cdot 10^{10}$ ед./с. Катастрофический отказ и тиристорный эффект ТК датчиков давления не наблюдались вплоть до предельных уровней воздействия $1,5 \cdot 10^{10}$ ед./с при исследованиях с использованием импульсного ускорителя «АРСА» и до $1,5 \cdot 10^{12}$ ед./с при исследованиях с использованием лазерного источника «Радон-5М».

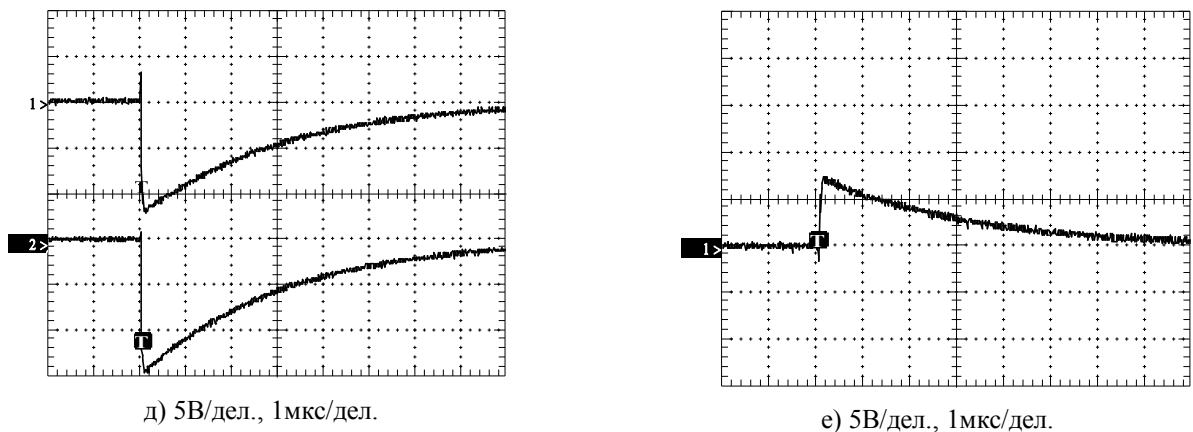


Рис. 10 - Осциллограммы отклика датчика давления при импульсного ИИ $1,5 \cdot 10^{10}$ ед./с: а) выходного напряжения, б) напряжения разбаланса

В результате экспериментального исследования можно сделать следующие основные выводы:

- Основным фактором, определяющим ионизационный отклик ТК датчиков давления, является ионизационная проводимость диэлектрической изоляции.
- Асимметрия контактных площадок и металлизации ТК датчиков давления приводит как к уменьшению чувствительности, так и к отклонению выходного напряжения датчика на величины, сравнимые с напряжением питания ТК.
- Амплитуда ионизационного отклика выходного напряжения и напряжения разбаланса мостовой схемы датчиков давления существенно зависит от неоднородности ионизации и может демонстрировать нелинейную зависимость от мощности дозы.
- Экспериментальное определение уровня стойкости ТК датчиков давления по эффекту ионизационной проводимости диэлектрика затруднительно проводить с использованием методов и средств лазерного имитационного моделирования.
- При воздействии стационарного ИИ до уровня $1,0 \cdot 10^6$ ед. ТК датчиков давления сохраняет работоспособность. Параметры: ток потребления, выходное напряжение, изменение выход-

ного напряжения в заданном диапазоне изменений давлений, нелинейность выходной характеристики в ходе облучения не испытывают заметной деградации.

- Смещение характеристики преобразования ТК датчиков давления при воздействии стационарного ИИ до уровня $1,0 \cdot 10^6$ ед. составляет не более 15%.
- Нелинейность выходной характеристики существенно зависит от скорости изменения входной физической величины (давления) и составляет не более 2,7% при воздействии стационарного ИИ до уровня $1,0 \cdot 10^6$ ед. (рис. 11).

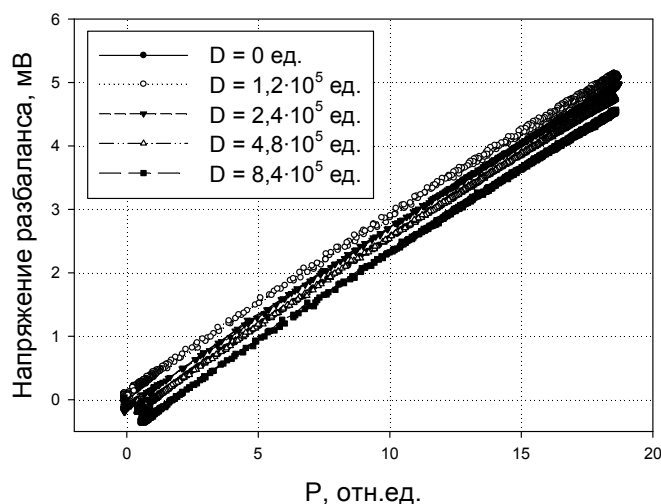


Рис. 11 - Зависимости характеристики преобразования датчиков давления от уровня воздействия стационарного ИИ

Таким образом, в результате анализа литературных данных, проведенного моделирования, результатов экспериментального исследования следует сделать вывод о высокой потенциальной радиационной стойкости изделий МЭМС, которые являются перспективным решением для создания сложных радиационно-стойких устройств.

Литература

1. Никифоров А.Ю., Бойченко Д.В., Артамонов А.С., 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.
2. Бойченко Д.В., Согоян А.В. Радиационная чувствительность пьезопреобразователей механических величин // Датчики и системы. – 2010. - №3 – С.19-22.
3. Artamonov A.S., Boychenko D.V., Nikiforov A.Y., Sogoyan A.V., Shelepin N.A., Telets V.A., Tverskoy M.G. Single-chip pressure sensor radiation hardness research // Proc. of 8th European Conf. "Radiation and its Effects on Components and Systems" (RADECS 2001), 2001. P. 296-299.