

Радиационная стойкость МЭМС-сенсоров и методика ее оценки

А.И. Власов, С.А. Милешин, Т.А. Цивинская, В.А. Шахнов

Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, vlasov@iu4.ru

Аннотация — Статья посвящена анализу радиационной стойкости МЭМС-сенсоров на основе монокристаллического кремния в качестве конструкционного материала чувствительных элементов МЭМС. Основное внимание уделено методике оценки параметров радиационной стойкости. Приведен анализ факторов влияния радиации на МЭМС-сенсоры. Дан сравнительный анализ радиационной стойкости серийного акселерометра и заказного МЭМС сенсора. Предложена конструкция акселерометра, способного выдерживать космическое излучение большой интенсивности.

Ключевые слова — монокристаллический кремний, радиационная стойкость, радиация, кремниевая мембрана, МЭМС - сенсоры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы обеспечения радиационной стойкости современных МЭМС-сенсоров специального назначения приобретают все большую актуальность. Прежде чем устройство будет рекомендовано к использованию в аппаратуре космического назначения, оно должно быть соответствующим образом проверено. В результате проверки подтверждается работоспособность устройства в условиях работы в космосе. В комплекс испытаний наравне с воздействием температуры, давления и вибрации входит и воздействие радиации. При отсутствии определенных рекомендаций при проведении радиационных тестов для MEMS часто используют стандартные способы оценки радиационной стойкости, разработанные для микроэлектроники [1-4].

Процедура радиационной отбраковки состоит из нескольких шагов и позволяет установить, будет ли работать тот или иной функциональный узел должным образом в различных условиях окружающей среды. Первым шагом является определение окружающей среды путем вычисления ее временного и пространственного состава, то есть, энергетических потоков и массы ионов. Рассматриваемая компьютерная модель CREME96 (Nymmiketal, 1996), как аналог ГОСТ 25645, способна предсказывать потоки каждого излучателя по функции местоположения и времени. На втором шаге определяется общий уровень защиты, который обеспечивает космический корабль, конструкция его частей и обшивки. На рис. 1 представлен пример того, как изотропная защита влияет на радиационное

окружение на уровне устройства [1]. Из графика видно, как поглощенная доза уменьшается с толщиной алюминиевой обшивки при 5-летнем пребывании на МКС [1]. Защита не только ослабляет поток частиц в конкретной точке устройства, но также преобразует энергетический спектр. В результате чего низкоэнергетические частицы преобладают над высокоэнергетическими. Это важно, поскольку степень деградации зависит не только от типа частиц, но и от их энергий при бомбардировке объекта испытаний. На следующем шаге определяют режимы потери работоспособности устройства и их зависимость от уровня радиации. Если уже имеются данные радиационных тестов для определенных режимов работы устройства, то дальнейшие расчеты позволяют выяснить, будут ли устройства работоспособны в течение миссии в условиях облучения, определенных на втором шаге.

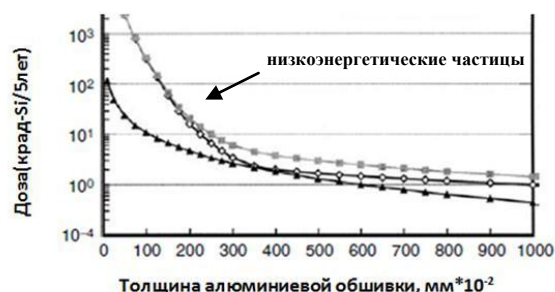


Рис. 1. Распределение энергии радиационных доз в алюминиевой обшивке корабля [1]

В случаях, когда нет данных лабораторных испытаний, проводят эксперименты, имитирующие воздействие космического излучения. Для этого используют ускорители частиц (протонов или тяжелых ионов), а также смотрят эффекты смещения и степень ионизации от радиоактивных источников (Co^{60}) или рентгеновского излучения. Полученная информация используется для предсказания поведения устройства в требуемых условиях при воздействии заряженных частиц. Последним этапом является анализ на уровне системы и подсистемы, который позволяет определить, насколько деградация параметров конкретного устройства влияет на работоспособность космического корабля в целом. Воздействие радиации может приводить как к эффектам, не оказывающим никакого влияния на систему, так и к эффектам, приводящим к системным отказам. Существует множество способов

нивелирования негативного эффекта. Это может быть «холодное резервирование» или усиленная защита устройств.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПРОТИВОРЕЧИЯ

Анализу причин радиационных повреждений МЭМС-устройств посвящен ряд работ [7-9]. Основная проблема заключается в том, что радиационно-стойкий МЭМС-сенсор должен быть защищен металлизированными слоями, что конструктивно может ухудшить его точностные характеристики.

На первом этапе необходимо исследовать взаимодействие между заряженными частицами и материалами (металлы, диэлектрики и полупроводники), используемыми при изготовлении МЭМС-устройств. Для этого необходимо знать массу этих частиц и распределение по энергии, а также свойства, вид и плотность материалов, через которые частицы проникают. При взаимодействии излучения с веществом освобождается внутренний заряд, разрушаются химические связи, и атомы смещаются из своего равновесного состояния. Эти эффекты уже давно изучены и успешно могут быть смоделированы. Механические свойства, такие как плотность и хрупкость, при воздействии космических частиц, в основном, не изменяются. При этом электрические свойства материалов, наоборот, изменяются значительно под воздействием радиации. Как известно, генерация заряда и смещение атомов изменяют электрические свойства материалов до такой степени, что работа устройств, таких как транзисторы, может стать сильно нестабильной. Чтобы сделать общие выводы о воздействии радиации на МЭМС-устройства необходимо провести исследования взаимодействия заряженных частиц с различными материалами. Заряженные частицы, проходящие через вещество, отталкиваются от атомов, теряют энергию и замедляются. Основное влияние оказывают Кулоновские силы отталкивания электронов, связанные с неподвижными атомами. Этим электронам необходима энергия, чтобы отделиться от своих атомов. После того, как высвобожденные электроны (или дельта-лучи) улетят достаточно далеко от места своего происхождения, они сталкиваются с другими электронами в кристаллической решетке, также освобождая их. Первоначально высокая плотность электронов и дырок образует облако заряда. Начальная ширина облака меньше микрона, но в очень короткое время (порядка пикосекунд) электроны расходятся далеко от него и изначально высокая плотность заряда быстро уменьшается.

Единицей измерения энергетических потерь иона и поглощения материалом является рад. 1 рад равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 грамм передается энергия ионизирующего излучения 100 эрг. Например, для кремния рад – это энергия, поглощенная в кремнии и обозначаемая как рад(Si). Поглощенная доза может быть вычислена по формуле Бете [1], которая описывает величину энергетических потерь через

толщину элемента и ионизацию при прохождении частиц через вещество (1):

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{m_0 v^2} N Z B(m_0, v, I) \quad (1)$$

где n – скорость частицы, z – заряд частицы, N – концентрация, Z – атомный номер материала поглотителя; m_0 – масса электрона; e – заряд электрона; I – средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица (определяется экспериментально и зависит от типа вещества: для Si – 3,6эВ, для GaAs – 4,8 эВ); $B(m_0, n, I)$ – медленно меняющаяся функция от n , такая, что энергетические потери от прохождения иона через материал превосходят заряд B .

Нормализованная форма этого выражения, независимая от плотности материала, получена делением дифференциала потерянной энергии по плотности, называемой линейным распределением энергии (ЛРЭ), и используется как метрика в большинстве радиационных расчетов (2):

$$\text{ЛРЭ} = \frac{dE}{\rho dx} \quad (2)$$

При малых значениях энергии ЛРЭ увеличивается с ростом этой энергии, а при достижении максимума ЛРЭ начинает уменьшаться с дальнейшим ростом энергии. Поэтому высокоэнергетические частицы при прохождении через вещество теряют энергию, в результате чего ЛРЭ увеличивается. На рис. 2 показано, как ЛРЭ иона гелия изменяется на глубине 2,5 МэВ в кремнии. Плотность заряда вдоль всей траектории пропорциональна ЛРЭ в каждой точке.

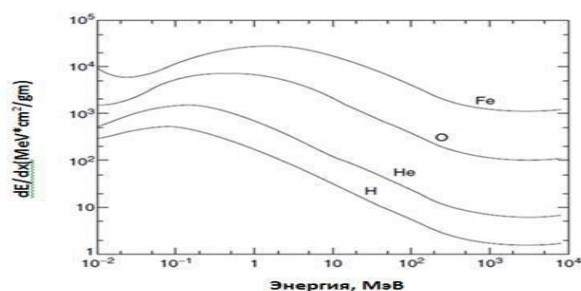


Рис. 2. Энергетические потери по мере глубины нахождения в объекте из кремния [1]

Реакция МЭМС на воздействие радиации частично определяется тем, где происходит смещение заряда (рис. 3). Например, ионы, проходящие через металлические слои МЭМС, порождают дополнительные электроны, но из-за того, что они составляют малую часть уже существующих в металле электронов, они не оказывают никакого эффекта на работу МЭМС. Напротив, ионы, проходящие через изоляторы и полупроводники, при воздействии радиации могут создать достаточный заряд, что вызовет существенные изменения работы устройств, таких как транзисторы и диоды.

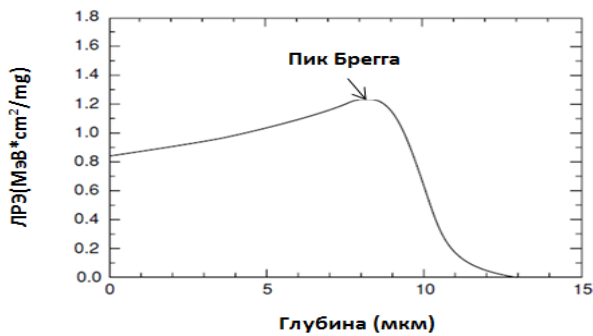


Рис. 3. ЛРЭ иона гелия как функция на глубине 2.5 МэВ в кремнии [2]

Заряд, созданный в изоляторах, может быть захвачен в ловушках, где сможет находиться в течение долгого времени. Это, в свою очередь, может искажать локальные электрические поля и влиять на плотность носителей в полупроводнике.

Например, положительный заряд, задержанный в окисле транзистора, привлечет электроны в полупроводнике к месту контакта. Увеличенная концентрация электронов в слое окисла или полупроводника может вызвать увеличение тока утечки в транзисторе; в то время как положительный заряд, захваченный в окисле затвора транзистора, может препятствовать нормальной работе транзистора, вызвав функциональный сбой. Количество задержанного заряда зависит от общей дозы ионизации (ОДИ), которая увеличивается с воздействием радиации. Таким образом, в космосе, где устройства непрерывно подвергаются воздействию радиации, постоянно растет накопленный заряд, приводящий к появлению вышеописанных утечек и поломок. Эффекты в результате воздействия ОДИ в МЭМС могут происходить как в электронной части, так и в механической. Независимо от места происхождения необходимо, чтобы заряд был задержан в изоляторе, и чтобы такой заряд искажал существующее электрическое поле до момента существенного влияния на работоспособность. Электроны и «дырки», созданные высокозаряженными ионами, проходящими рядом или через полупроводниковые p-n переходы, будут разделены соответствующими электрическими полями. Разделение заряда меняет электрический потенциал на всей ширине соединения, и дифференциалы напряжения могут распространяться через всю схему на другие узлы. Когда изменение напряжения происходит в регистре-защелке или в ячейке памяти, хранящая там информация может быть изменена без разрушения. Изменение состояния защелки относят к одиночным сбоям (англ. single event upset, SEU). Он так называется, потому что всего одна частица, взаимодействующая с веществом, освобождает достаточный заряд, чтобы вызвать изменение. В некоторых случаях заряд, захватываемый в оксиде затвора силового МОП-транзистора, может привести даже к выгоранию. Вполне возможно, эти типы эффектов будут возникать в электронных схемах МЭМС, но вряд ли они произойдут в механических

узлах. При чрезвычайно высоких уровнях смещений электронов могут быть затронуты свойства сыпучего материала, такие как жесткость. Это будет очевидно происходить и в устройствах МЭМС, которые базируются на этих свойствах для правильной работы. Например, возможно изменение жесткости кремниевых слоев, используемых в приводах, которые являются частью МЭМС двигателя. Уровни радиации для большинства космических миссий, за исключением, возможно, полета на Юпитер, на несколько порядков ниже, чем необходимо, чтобы оказывать заметное влияние на свойства материала и поэтому, в большинстве случаев, могут не приниматься в расчет.

MEMS уникальны с точки зрения радиационных воздействий, поскольку они содержат электронные схемы управления в сочетании с механическими структурами, оба из которых потенциально чувствительны к радиационному повреждению. Электронные схемы МЭМС могут быть выполнены по КМОП или биполярной технологии, которые, как известно, подвержены воздействию радиации. Считать, что дозы облучения, которые производят значимые изменения в электронных схемах, не будут иметь влияние на механические структуры, ошибочно.

В качестве примера проанализируем радиационную стойкость типового коммерческого датчика и датчика в специсполнении.

III. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАКАЗНЫХ И КОММЕРЧЕСКИХ МЭМС-СЕНСОРОВ

В качестве объекта практической оценки возьмем датчик СЕАЖ.402131.004 (НОЦ "Наносистемы" МГТУ им. Н.Э. Баумана) и серийный акселерометр ADXL50, который используется, прежде всего, в автомобильной промышленности для работы подушек безопасности во время аварии.

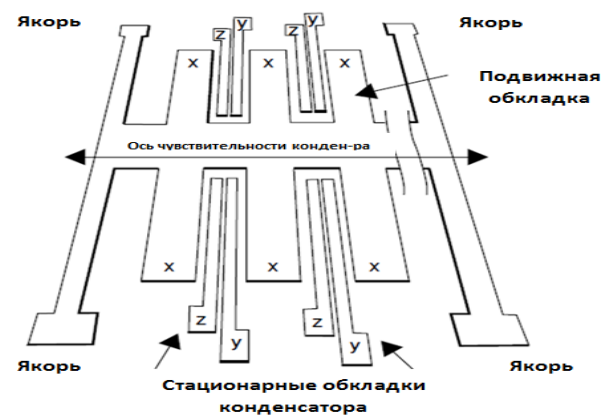


Рис. 4. Устройство ADXL50 [6]

На рис. 4 приведено устройство акселерометра ADXL50 [6]. Данный вид акселерометров нашел применение в космосе, например, в малогабаритных космических коммерческих аппаратах.

Он состоит из двух наборов гребенчатой структуры. Один набор жестко закреплен (Y и Z), а другой (X) связан с пружинной балкой, которая перемещается, когда устройство встречает ускорение вдоль гребней.

На рис. 5 показано поперечное сечение ADXL50 и видно, что гребенчатые балки подвешены над кремниевой подложкой, покрытой тонким слоем Si_3N_4 и SiO_2 .

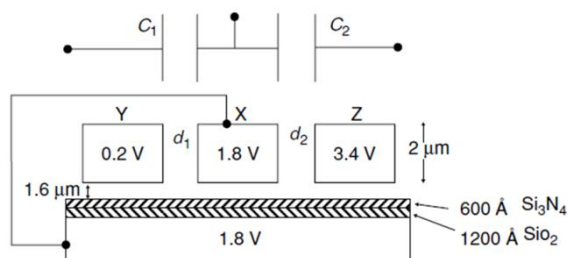


Рис. 5. Топологический разрез акселерометра [6]

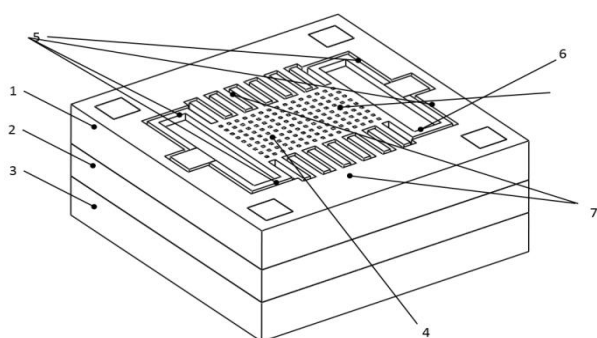


Рис. 6. Акселерометр СЕАЖ.402131.004

Размер d_1 – расстояние между направляющими X и Y, которые образованы двумя обкладками конденсатора C_1 ; d_2 разделяет X и Z, образованные обкладками конденсатора C_2 . Движение по X изменяет как d_1 , так и d_2 . Это изменяет C_1 и C_2 . На рис. 6 показана схема измерения изменений емкости. Внутренний осциллятор подает два отдельных прямоугольных сигнала на конденсаторы координат Y и Z. Так как два сигнала находятся не в одной фазе, выходное напряжение от датчика равно нулю так как $C_1=C_2$. Однако, когда устройство ускоряется, балка X перемещается относительно балок Y и Z так, что C_1 становится неравным C_2 . Результатом является постоянное напряжение на X, которое демодулируется и сравнивается с опорным напряжением в буферном усилителе. Разница между двумя напряжениями пропорциональна ускорению и отображается на выходе устройства. X электрически привязан к подложке, чтобы не допустить смещение гребней к подложке при наличии разности напряжений между X и подложкой. Этот эффект приведет к неправильной оценке напряжения на выходе. На рис. 7 представлена схема акселерометра.

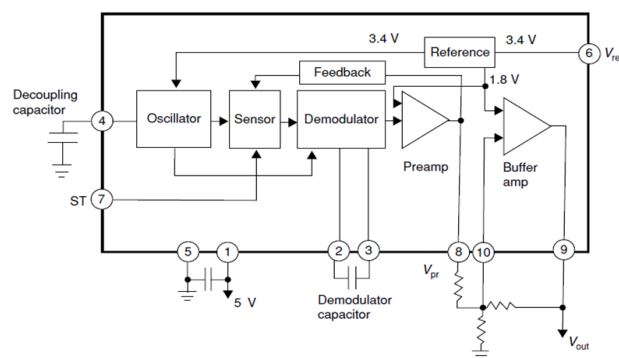


Рис. 7. Структурная схема ADXL50 [6]

Датчик СЕАЖ.402131.004 выполнен на технологии кремний-диэлектрик-кремний. Структура «кремний – диэлектрик – кремний» (КДК) представляет собой опорную пластину кремния, на которой поверх слоя диэлектрика (оксид кремния) нанесен приборный слой кремния толщиной до нескольких микрон. На структурах КДК удается получать приборы с улучшенными характеристиками по сравнению с аналогичными приборами, изготовленными на обычных кремниевых пластинах.

Технологические процессы изготовления интегральных микросхем, адаптированные для производства МЭМС-структур, могут послужить наиболее подходящей основой для производства микромеханических приборов с улучшенными техническими характеристиками. Замена изоляции p-n-переходом компонентов чувствительных элементов на полную диэлектрическую изоляцию позволит улучшить такие характеристики датчиков, как радиационная и температурная стойкость. Преимущество КДК-структур перед структурами на основе объемного кремния достигается использованием надежной изоляции рабочего объема пьезорезистора от подложки. На рис. 6 обозначены полупроводниковые кристаллы 1, 2, 3; подвижная инерционная масса 4; четыре упругие балки 5 на неподвижной части полупроводникового кристалла 1; гребенчатая структура 6; конгруэнтная ей гребенчатая структура 7; подвижная инерционная масса 8 четырех упругих перемычек 9, закрепленная в неподвижной части 10 кристалла; широтно-импульсный модулятор (ШИМ) 11; мультиплексор 12; аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 13 и блок обработки 14; частотный генератор (ЧГ) 15. Для достижения требуемого уровня радиационной стойкости в комбинированном трехосевом микромеханическом преобразователе ускорения (он содержит чувствительные элементы в виде гребенчатых структур из полупроводниковых кристаллов) наносятся проводящие слои, которые располагаются соосно по вертикали, перпендикулярно первому направлению и перпендикулярно второму направлению. Между ними установлена инерциальная масса, которая представляет собой обкладку пары переменных конденсаторов. Она имеет возможность перемещения, при этом неподвижная обкладка одного

из переменных конденсаторов расположена на нижней стороне первого верхнего кристалла, а неподвижная обкладка второго конденсатора расположена на верхней стороне второго кристалла. Нижний кристалл с гребенчатой структурой выполняют идентичным и конгруэнтным верхнему кристаллу, при этом в комбинированный трехосевой микромеханический преобразователь ускорения вводят широтно-импульсные модуляторы, мультиплексор, аналого-цифровой преобразователь, частотный генератор и блок обработки, причем каждый вход широтно-импульсного модулятора связан с первым неподвижным выходом верхнего кристалла, с одной из обкладок инерциальной массы и неподвижной обкладкой второго конденсатора, входы чувствительных элементов выведены на «землю», а выходы всех элементов соединены с входом мультиплексора, первый выход которого через аналого-цифровой преобразователь соединен с блоком обработки, а второй выход с блоком обработки непосредственно. На рис 8. представлена схема СЕАЖ.402131.004.

Первый эксперимент включал облучение всего устройства протонами с энергией 65 МэВ и регистрацию сигналов на выходах предусилителя ADXL50 (V_{pr}) и буферного усилителя (V_{out}). Протонное облучение вызвало смещение V_{pr} и V_{out} , но в разных направлениях. Кроме того, мощность дозы оказала значительное влияние как на величину, так и на направление смещения. Эти результаты были предсказуемы, т.к. ADXL50 содержит схемы управления CMOS, которые, как известно, чувствительны к ионизирующему излучению. Размещение апертуры над акселерометром для покрытия электронной цепи позволило проверить влияние ионного пучка непосредственно на механическую часть. Рис. 9 показывает, что V_{out} экспоненциально уменьшается с кумулятивным излучением. Снижение не зависит от мощности дозы. Дополнительные эксперименты с протонами показывают, что величина распада зависит только от того, включено или выключено устройство. Эти результаты показывают, что поглощение заряда в слоях SiO_2 или Si_3N_4 приводит к изменению V_{out} .

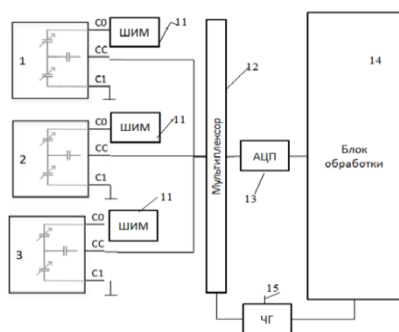


Рис. 8. Структурная схема датчика СЕАЖ.402131.004

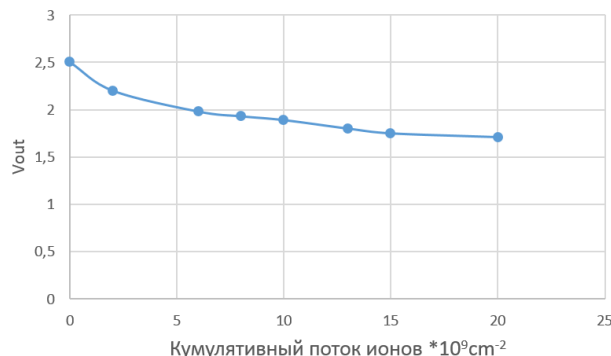


Рис. 9. Зависимость V_{out} от потока ионов

Ионизирующие частицы, проходящие через изолятор, генерируют заряд, который может захватываться в изоляторах и модифицировать существующие электрические поля между гребнями. Это может привести к смещению одного гребня по отношению к другому. Результатом является изменение емкости между двумя гребнями, что приводит к изменению выходного напряжения.

Предлагаемый механизм генерации и захвата заряда изолятором был подтвержден в результате испытаний СЕАЖ.402131.004, содержащего проводящий слой поликристаллического кремния поверх изоляторов. Проводящий слой эффективно экранирует любой заряд, генерируемый в изоляторах, так что радиация не оказывает влияния на работу механической части. Облучение устройства протонами подтвердило, что выходное напряжение не изменялось.

Математическое моделирование подтвердило, что захват заряда в изоляторах может вызвать изменение $U_{вых}$. Анализ результатов исследований показывает, что очень высокие дозы излучения фактически заставляли устройство записываться и прекращать работу предположительно из-за сгибания гребней до такой степени, что они соприкасались с подложкой. Таким образом, в космосе невозможно использование стандартных серийных акселерометров. Датчик СЕАЖ.402131.004 потенциально способен удовлетворять жестким условиям эксплуатации в дальних космических экспедициях.

IV. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Модель, используемая в вышеприведенном анализе, предназначена для количественного описания потоков частиц Галактических космических лучей (ГКЛ) на орбите Земли за ее магнитосферой в ходе модуляции, обусловленной 11-летней вариацией солнечной активности и 22-летним циклом изменения крупномасштабного общего магнитного поля Солнца.

Моделью описываются потоки частиц с зарядом от 1 до 92 эВ (включая электроны) в диапазоне энергии от 5 до 10⁵ МэВ/нуклон.

В модели обобщены имеющиеся современные экспериментальные данные о потоках частиц на орбите Земли в их зависимости от:

- уровня солнечной активности (усредненное по 12 месяцам число солнечных пятен, т.е. число Вольфа);
- величины и направления крупномасштабного магнитного поля гелиосферы (полярное магнитное поле Солнца).

В модели учтены эффекты запаздывания изменения потоков частиц при изменении уровня солнечной активности, зависящие как от жесткости частиц так и обусловленные разницей траекторий (и времени) диффузии частиц при разном направлении гелиосферного магнитного поля.

Точность долговременного прогноза величин потоков частиц зависит главным образом от точности прогноза числа солнечных пятен на прогнозируемый период солнечной активности.

Одна из последних версий модели утверждена международным стандартом ISO 15390 [17].

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Производительность MEMS-устройств в космосе в значительной степени определяется радиационной обстановкой, которая, в свою очередь, зависит от местоположения космического аппарата и срока его существования. Оценка параметров окружающей среды требует знания такой информации, как дата запуска, продолжительность миссии и высота орбиты, а также степень экранирования, обеспечиваемая космическим аппаратом.

Авторами предложена модель акселерометра, которая может выдержать жесткое облучение при дальних космических экспедициях. Для достижения требуемой радиационной стойкости в комбинированном трехосевом микромеханическом преобразователе ускорения (он содержит чувствительные элементы в виде гребенчатых структур из полупроводниковых кристаллов) наносятся проводящие слои, которые располагаются соосно по вертикали, перпендикулярно первому направлению и перпендикулярно второму направлению. Между ними установлена инерциальная масса, которая представляет собой обкладку пары переменных конденсаторов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stephen P. Buchner. Space Radiation Effects and Microelectromechanical Systems//MEMS and Microstructures in Aerospace Applications.PP 12-34.
- [2] Frank Kreith, Roop Mahajan. Fundamentals of Environmental Discharge Modeling//MEMS. Inroduction and fundamentals.2006.PP 233-240.
- [3] Артемьев Б.В., Буклей А.А. Радиационный контроль. - Москва, Изд-во РОНКТД. 2011. Сер.Диагностика безопасности.
- [4] Глушко А.А., Юлкин А.С. Особенности оптимизации технологических режимов производства КНИ КМОП СБИС по критерию стойкости к воздействию

- спецификаторов // Труды научно-исследовательского института системных исследований Российской академии наук. 2013. Т. 3. № 1. С. 20-23.
- [5] Денисов А.А., Кальнов В.А., Шахнов В.А. Проектирование наносенсоров - М. Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. Сер. Библиотека "Наноинженерия". Том 6. 126 с. ил.:
- [6] Reference manual. ADXL50. AnalogDevices. 2010.
- [7] S. A. Mileshein, P. V. Grigoriev, L .G. Avaeva and T. A. Tsivinskaya Thermal MEMS flow meter for gaseous working fluids on the basis of the hot-wire thermoanemometric sensor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 151, Number 1. 2016. PP. 209-214.
- [8] Андреев К.А., Милешин С.А., Цивинская Т.А. Анализ методов электростатической сварки кремния и стекла при производстве высокоточных датчиков // Датчики и системы. 2013. № 2 (165). С. 45-49.
- [9] Тиняков Ю.Н., Милешин С.А., Андреев К.А., Цыганков В.Ю. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 9. С. 4.
- [10] Аваева Л. Г., Милешин С. А., Сергеева Н. А., Цивинская Т.А. Математическое моделирование сенсора давления повышенной надежности при эксплуатации в экстремальных условиях // Надежность и качество 2017: Сборник трудов XXII международного симпозиума. - Пенза, ПГУ. 22 - 31 мая 2017 г.
- [11] Милешин С.А., Сергеева Н.А. Моделирование сенсора давления повышенной надежности при эксплуатации в экстремальных условиях//Энергосбережение и эффективность в технических системах Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Тамбовский государственный технический университет.2017. С. 223-224.
- [12] Аваева Л.Г., Сергеева Н.А., Милешин С.А., Цивинская Т.А. Анализ проблем производства кристаллов чувствительных элементов из монокристаллического кремния для сенсорных систем // Датчики и системы. 2017. № 5 (214). С. 25-31.
- [13] Vlasov A.I., Terent'ev D.S., Shakhnov V.A.Graphene flexible touchscreen with integrated analog-digital converter // Russian Microelectronics. 2017. Т. 46. № 3. С. 192-199.
- [14] Andreev K.A., Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Silicon pressure transmitters with overload protection // Automation and Remote Control. 2016. Т. 77. № 7. С. 1281-1285.
- [15] Сергеева Н.А., Цивинская Т.А., Шахнов В.А. Контрольно-измерительные МЭМС с использованием малогабаритных чувствительных элементов из монокристаллического кремния для аэрокосмической отрасли // Датчики и системы. 2016. № 3 (201). С. 32-39.
- [16] Бутин А.В. Устройство для измерения накопленной дозы с использованием р-канальных МОПТ из состава КМОП-микросхем // Проектирование и технология электронных средств. 2017. № 1. С. 47-51.
- [17] Nymmik R.A., Suslov A.A., Characteristics of Galactic cosmic ray flux lag times in the course of solar modulation, Adv. SpaceRes. 16(9), 217-220, 1995
- [18] Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х книгах. - Москва: Техносфера, 2015. – 488 с.

Radiation Resistance of MEMS Sensors and Methods of its Estimation

A.I. Vlasov, S.A. Milesheva, T.A. Tsivinskaya, V.A. Shakhnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow,

shakhnov@iu4.bmstu.ru

Abstract - The article is devoted to the analysis of radiation stability features of MEMS sensors based on single-crystal silicon as a structural material of MEMS sensitive elements. The main attention is paid to the method of estimating the parameters of radiation resistance. The analysis of the influence of radiation on MEMS sensors is given. A comparative analysis of the radiation resistance of a serial accelerometer and a custom-made MEMS sensor is given. The construction of an accelerometer capable of withstanding cosmic radiation for long-range expeditions is given.

Keywords: monocrystalline silicon, radiation resistance, radiation, silicon membrane, MEMS sensors.

REFERENCES

- [1] Stephen P. Buchner. Space Radiation Effects and Microelectromechanical Systems // MEMS and Microstructures in Aerospace Applications. PP 12-34.
- [2] Frank Kreith, Roop Mahajan. Fundamentals of Environmental Discharge Modeling // MEMS. Introduction and fundamentals. 2006. PP. 233-240.
- [3] Artemiev BV, Buckley AA Radiation monitoring. - Moscow, Izd-vo in the RSNTTD. 2011. Ser. Diagnostics of safety.
- [4] AA Glushko, AS Yulkin Peculiarities of optimization of technological modes of production of KNI CMOS VLSI by the criterion of resistance to the effects of specifiers // Proceedings of the Research Institute for System Studies of the Russian Academy of Sciences. 2013. T. 3. No. 1. P. 20-23.
- [5] Denisov AA, Kalnov VA, VA Shakhnov Designing of Nanosensors - M. Izd-vo MSTU named after NE Bauman, 2011. Ser. Library "Nanoengineering". Volume 6. 126 pp.
- [6] Reference manual. Adxl50. Analog Devices. 2010.
- [7] S. A. Milesheva, P. V. Grigoriev, L.G. Avaeva and T. A. Tsivinskaya Thermal MEMS flow meter for gaseous working fluids on the basis of the hot-wire thermoanemometric sensor // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 151, Number 1. 2016. PP. 209-214.
- [8] Andreev KA, Milesheva SA, Tsivinskaya TA Analysis of methods of electrostatic welding of silicon and glass in the production of high-precision sensors // Sensors and systems. 2013. No. 2 (165). Pp. 45-49.
- [9] Tinyakov Yu.N., Milesheva SA, Andreev KA, Tsygankov V.Yu. Analysis of the designs of foreign prototype pressure sensors // Science and education: a scientific edition of the MGTU. N.E. Bauman. 2011. № 9. With. 4.
- [10] Avaeva LG, Milesheva SA, Sergeeva NA, Tsivinskaya TA Mathematical modeling of the pressure sensor of increased reliability during operation under extreme conditions // Reliability and quality 2017: Collection of Proceedings of the XXII International Symposium. - Penza, PGU. May 22 - 31, 2017.
- [11] Milesheva SA, Sergeeva NA Modeling of the pressure sensor of increased reliability in operation under extreme conditions // Energy saving and efficiency in technical systems. Materials of the IV International Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists. Tambov State Technical University. Pp. 223-224.
- [12] Avaeva LG, Sergeeva NA, Milesheva SA, Tsivinskaya TA Analysis of the problems of production of crystals of sensitive elements from monocrystalline silicon for sensor systems // Sensors and systems. 2017. No. 5 (214). Pp. 25-31.
- [13] Vlasov A.I., Terent'ev D.S., Shakhnov V.A. Graphene flexible touchscreen with integrated analog-digital converter // Russian Microelectronics. 2017. T. 46. No. 3. P. 192-199.
- [14] Andreev K.A., Vlasov A. I., Shakhnov V.A. Silicon pressure transmitters with overload protection // Automation and Remote Control. 2016. 77. No. 7. P. 1281-1285.
- [15] Sergeeva NA, Tsivinskaya TA, Shakhnov VA Control and measuring MEMS with the use of small-sized sensitive elements from monocrystalline silicon for the aerospace industry // Sensors and systems. 2016. No. 3 (201). Pp. 32-39.
- [16] Butin A.V. A device for measuring the accumulated dose using p-channel MOSFETs from the composition of CMOS microchips // Design and technology of electronic devices. 2017. No. 1. P. 47-51.
- [17] Nymmik, R.A., Suslov, A.A., Characteristics of Galactic cosmic ray flux lag times in the course of solar modulation, Adv. Space Res. 16 (9), 217-220, 1995.