

Радиационная стойкость модулей МЭМС

Димитр Димитров, Николай Данилин, Ильяс Сабиров (Москва)

В статье приведён обзор результатов зарубежных исследований радиационной стойкости модулей МЭМС различного назначения.

ВВЕДЕНИЕ

Модули микроэлектромеханических систем (МЭМС) с точки зрения радиационной стойкости являются уникальными изделиями, поскольку интегрируют микроэлектронные и микро-механические структуры, каждая из которых по-разному чувствительна к радиационным воздействиям. Микроэлектронные составляющие МЭМС

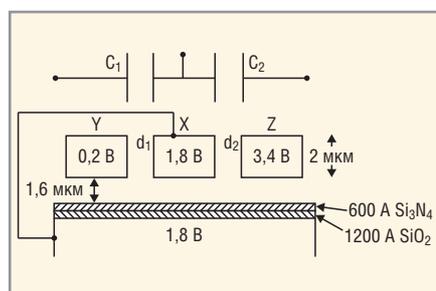


Рис. 1. МЭМС-структура акселерометра

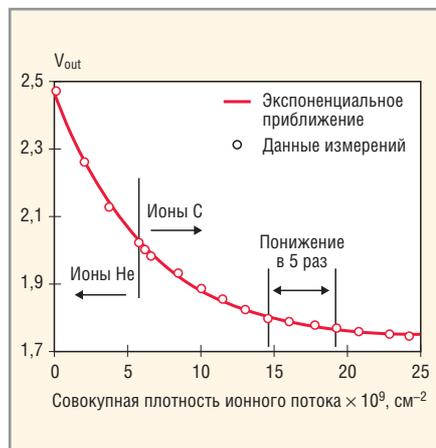


Рис. 2. Зависимость изменения V_{out} от интенсивности радиационного воздействия

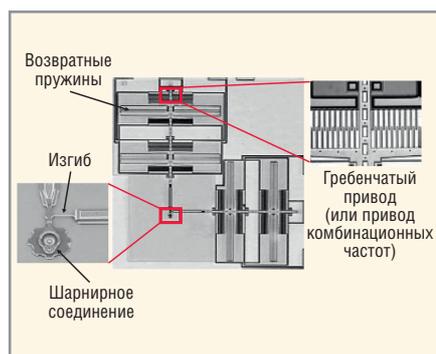


Рис. 3. МЭМС-структура микродвигателя Sandia National Laboratories

реализованы, как правило, на основе КМОП или биполярных технологий, особенности влияние радиации на которые известны.

Если микроэлектронные кристаллы давно являются объектом радиационно-стойкого проектирования, производства и тестирования, то производители и потребители МЭМС не представляют последствий воздействия радиации на микромеханическую структуру. К настоящему моменту, особенно с развитием разработки микроспутниковых систем, вопрос радиационной стойкости модулей МЭМС приобрёл большую значимость [1].

Первой некоммерческой МЭМС, тестированной ионным пучком, был акселерометр [2]. С помощью соответствующей фокусировки ионизирующий пучок был направлен на микромеханическую структуру кристалла. После некоторого варьирования интенсивности потока и угла направленности были замечены существенные изменения качества функционирования МЭМС. В результате накопления зарядов в изолирующем слое (который является частью микромеханической структуры) появились структурные изменения в материале, что привело к функциональным несоответствиям. Такое накопление зарядов через соответствующее электромагнитное поле влияет на правильный отчёт значений ускорения.

Последующее тестирование других типов МЭМС – радиочастотных ключей, микроэлектродвигателей, цифровых зеркальных матриц – также подтвердило радиационные повреждения в изолирующих слоях.

В связи с этим возникла задача определения радиационной стойкости при ионизирующем излучении в зависимости от электромагнитной чувствительности изолирующих слоёв микромеханических структур. При этом не были точно установлены механизмы возникновения еди-

ничных сбоях от тяжелых заряженных частиц.

В предлагаемой статье на примере нескольких типовых модулей МЭМС (акселерометр, микродвигатель и ВЧ-реле) проведён обобщённый анализ их радиационной стойкости и обозначены эффекты радиационных воздействий.

ТЕСТИРОВАНИЕ МЭМС НА РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Акселерометр. Первой исследованной на радиационную стойкость МЭМС был коммерческий акселерометр ADXL50, используемый для запуска автомобильных подушек безопасности. Ввиду малого веса, габаритов и потребляемой мощности было принято решение о его применении в микроспутниковой системе в рамках программы NASA (New Millenium Program). Прибор выполнен на кремниевой подложке, покрытой двумя слоями Si_3N_4 и SiO_2 . Схема управления акселерометра реализована по КМОП-технологии. Измеряемое ускорение пропорционально напряжению на выходе (V_{out}) схемы (см. рис. 1). Был проведён эксперимент по радиационному воздействию протонами с энергией 65 МэВ. В результате накопления зарядов в слоях Si_3N_4 и SiO_2 напряжение V_{out} изменялось согласно зависимости, приведённой на рисунке 2 [3]. Указанное изменение напряжения модифицирует характеристики электрического поля между пластинами в конструкции акселерометра, что смещает пластины относительно друг друга и тем самым меняет определяемую ими ёмкость и связанное с ней выходное напряжение V_{out} . Подобные результаты были получены и с акселерометром ADXL04, у которого на изолирующем слое нанесён проводящий поликристаллический кремний, связанный с пластинами прибора. При достаточном накоплении зарядов возможно возникновение тиристорного эффекта, что приводит к неработоспособности акселерометра.

Микродвигатель. На рисунке 3 представлен микродвигатель, разработанный Sandia National Laboratories для ряда космических приложений [4, 6]. Ме-

ханические и электрические характеристики микродвигателя оказались зависимыми от различных типов ионизирующих излучений, таких как электронные и протонные пучки или рентгеновское излучение. При этом было обнаружено непредусмотренное ограничение угла поворота выходного вала и в некоторых случаях временное или постоянное «заклинивание» вала. Физические эффекты радиационного воздействия аналогичны изменениям, выявленным при тестировании акселерометра ADXL04. Экспериментальные результаты показывают следующее:

- рентгеновское излучение вызывает неконтролируемое увеличение скорости вращения исходящего вала уже при накопленной дозе до 100 крад. В то же время при заземлении определённых выводов цепей управления и обратной связи такой эффект не наблюдается и при накопленной дозе 3 Мрад;
- электронный поток порядка $(1...3) \times 10^{13}/\text{см}^2$ вызывает непредусмотренный останов вращения вала. С применением заземляющего поликремниевое слоя влияние такого потока может быть в значительной степени устранено;
- протонный поток порядка $10^{13}/\text{см}^2$ существенно влияет на характеристики вращения двигателя.

ВЧ-реле. Типовое применение таких реле в космической аппаратуре – это антенны с электронным сканированием. Лаборатория NASA (Jet Propulsion Laboratory) провела испытания двух ВЧ-реле, которые отличаются только местоположением изолирующего слоя (см. рис. 4) [5]. Для тестирования был использован ис-

точник гамма-излучения $\text{Co } 60$. В зависимости от взаимного расположения металлизированного и изолирующего слоёв, а также от полярности и величины подаваемого образцового напряжения, установлено, что при положительном образцовом напряжении и стандартной геометрии изолирующего слоя, расположенного непосредственно у металлизированного слоя, уже при накопленной дозе 100...150 крад происходит сбой в работе реле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уменьшение чувствительности МЭМС к радиационным воздействиям затрудняется существующей методологией их проектирования (отсутствуют типовые радиационно-стойкие библиотечные решения), а также «классической» кремниевой технологией, которая не является радиационно-стойкой на некоторых стадиях производства [7].

Поскольку к настоящему времени действующие методики и нормативная документация по тестированию полупроводниковых гибридных структур «законно» применяются по отношению к МЭМС, необходимо отметить следующие важные направления дальнейшего развития проектирования, производства и тестирования радиационно-стойких модулей МЭМС:

- разработка методов проектирования радиационно-стойких и тестопригодных структур МЭМС;
- выбор и апробация кремниевых технологий для производства радиационно-стойких МЭМС;
- разработка методологии для «раздельного» радиационного тести-

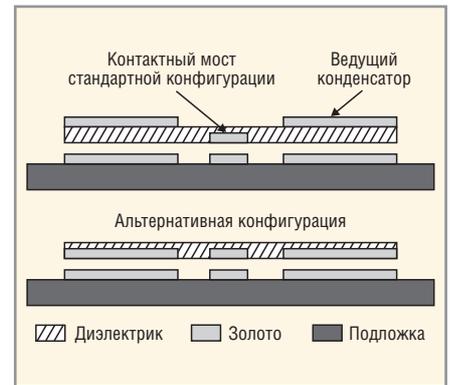


Рис. 4. Два варианта структуры ВЧ-реле

рования структур МЭМС (в части микроэлектроники и микромеханики).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Osinder S., Garrison A., Champion J.* MEMS and Microstructures in Aerospace Applications, Taylor&Francis, 2006.
2. *Knudson A., Buchner S., McDonalds P.* The effect of radiation on MEMS accelerometers, IEEE Transaction on Nuclear Science. Nov. 1998. Vol. 43.
3. *Edmonds L., Swift G., Lee C.* Radiation response of a MEMS accelerometer : an electrostatic force, IEEE Transaction on Nuclear Science. Dec. 1999. Vol. 45.
4. *Space Radiation Effects and Microelectromechanical Systems.* Short Course. NGC, NY, 2002.
5. *Clure S., Edmands I.* Radiation effects in MEMS: RF relays. IEEE Transaction on Nuclear Science. Dec. 1998. Vol. 49.
6. *Marshall P., Marshall C.* Proton effects and test issues for satellite applications. IEEE Nuclear and Space Radiation Effect Conference: Short Course. VA, 1999.
7. *Lacoe R.* CMOS scaling, design principles and hardenind-by-design methodologies. IEEE Nuclear and Space Radiation Effect Conference: Short Course. CA, 2003.

