

ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

УДК 531.768.004.9

DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-7

А. С. Баранов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

A. S. Baranov

MODERN TECHNOLOGY OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS DESIGN

Аннотация. *Актуальность и цели.* Российский рынок микроэлектромеханических систем (МЭМС-устройств) заполнен импортными датчиками и приборами, что показывает отсутствие массового потребителя данной продукции и, следовательно, невостребованность данной технологии в России. Целью работы является теоретическое исследование с применением современных программных средств процесса разработки инерциальных МЭМС-устройств. *Материалы и методы.* Для определения и оценки будущих выходных характеристик разрабатываемой конструкции чувствительного элемента (ЧЭ) МЭМС-акселерометра применено имитационное моделирование в программном обеспечении ANSYS. *Результаты.* Представлены аналитические расчеты и результаты имитационного моделирования воздействия ускорения на ЧЭ и определены резонансная частота элемента и максимальное перемещение инерционной массы. *Выводы.* Выходные характеристики разрабатываемого ЧЭ соответствуют ожидаемым, следовательно тип данной конструкции возможно использовать для дальнейшей разработки МЭМС-акселерометра.

Abstract. *Background.* The Russian market of microelectromechanical systems (MEMS devices) is filled by foreign sensors and devices, what shows an absence of the mass consumer on given products and owing to undemanding of this technology in Russia. The aim of work is a theoretical research with use of modern software for design process of inertial MEMS devices. *Materials and methods.* For definition and estimation of future output characteristics of developed sensitive element for MEMS accelerometer, the application of imitating modelling in software ANSYS were considered. *Results.* Analytical calculations and the results of imitating modeling of acceleration influence on sensitive element are presented and resonant frequency of element and maximum movement of inertial weight is defined. *Conclusions.* Output characteristics of developed sensitive element correspond to expectations, and, hence, the type of the given design should be used for further development of MEMS accelerometer.

Ключевые слова: проектирование МЭМС, имитационное моделирование, ANSYS, акселерометр.

Key words: MEMS-design, imitating modelling, ANSYS, accelerometer.

Исторически сложилось так, что датчикоостроение, получившее свое развитие с развитием авиации и ракетной техники, базируется на технологиях, хорошо зарекомендовавших себя в отраслях с массовым производством изделий. Так, в датчикоостроении в прошлом столетии основными технологиями акселерометрии являлись технологии точной механики, отработанные при производстве часов и других точных механизмов. В процессе стремительного развития микроэлектроники стало очевидным, что используемые при этом технологии могут быть с успехом применены в других отраслях техники.

В начале 80-х гг. прошлого столетия появились металлопленочные и емкостные датчики, где клеевые и механические соединения заменялись напыленными пленками. В это же время начали широко использоваться гибридно-пленочные технологии при производстве измерительных цепей. За счет применения пленочных технологий частично улучшались массогабаритные и метрологические характеристики акселерометров, но их радикальному улучшению препятствовали ограниченные возможности технологий механообработки в части формирования микрозазоров, микротолщин и микроплощадок.

В это время к существенному улучшению метрологических характеристик приводит использование материалов, применяемых в электронной промышленности, например оптически чистого плавленого кварца, отличающегося идеальными упругими свойствами [1, 2].

Разработаны и до настоящего времени широко используются акселерометры с магнитоэлектрическим уравниванием серий QA (США), MA (Япония), АЛЕ (РФ). Они отличаются высокой точностью, но не в полной мере отвечают требованиям времени по массогабаритным и энергетическим характеристикам.

Технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) или поверхностной микромеханики позволяют интегрировать датчик и измерительную цепь на едином кристалле небольшой площади. Отличительной особенностью поверхностных микромеханических конструкций является также и то, что при уменьшении габаритных размеров они сохраняют свои механические прочность и устойчивость пропорционально степени уменьшения толщины подвижных элементов датчика перемещения. А это приводит к необходимому созданию принципиально новых технологических линеек, которые могут быть окуплены только при массовом востребованном производстве МЭМС-продукции, что возможно далеко не в каждой стране. Подтверждением является то, что акселерометры на основе поверхностной микромеханики в массовом производстве общепринятого применения – автомобилей, смартфонов и другой электроники, созданы только в США, Японии, Китае и Корее. Пример выполнения инерционного элемента в акселерометре [3, 4] фирмы Analog Devices схематически показан на рис. 1, конструкция разрабатываемого чувствительного элемента (ЧЭ) – на рис. 2.

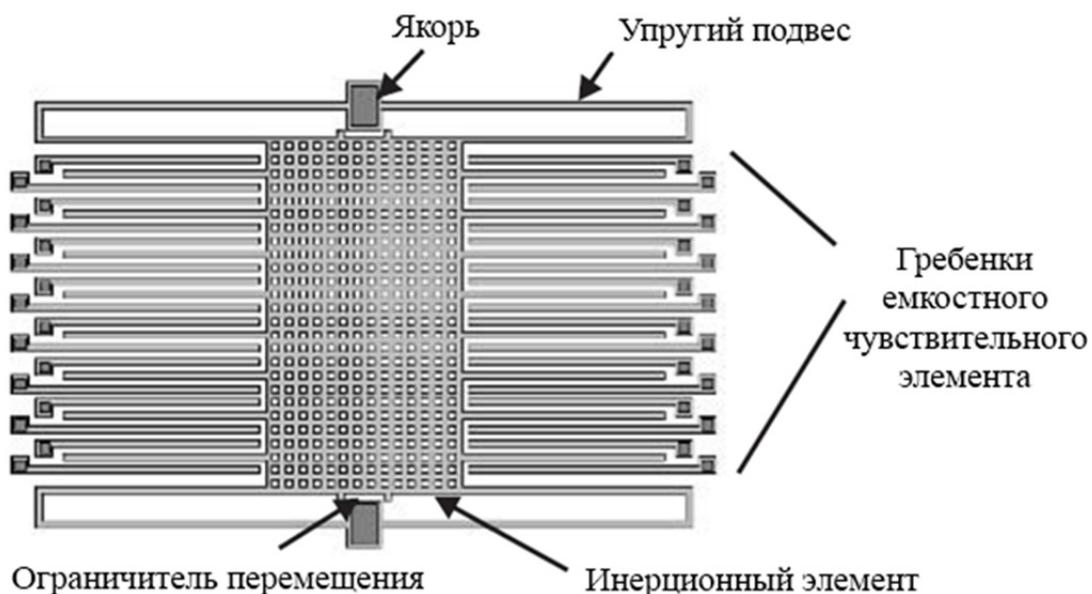


Рис. 1. Колебательная система акселерометра, выполненная методами поверхностной обработки кремния

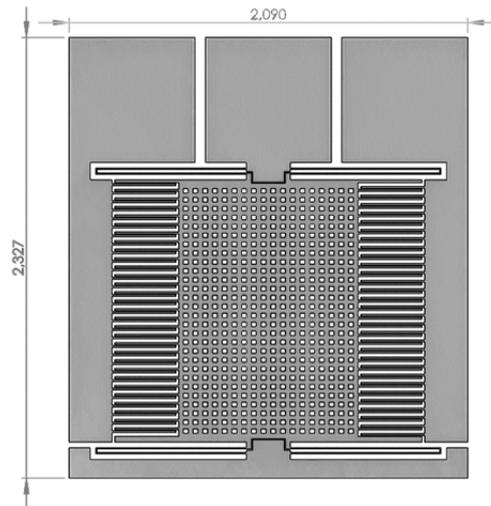


Рис. 2. Модель ЧЭ акселерометра, выполненного методами поверхностной обработки кремния

К технологическим процессам МЭМС с полным основанием относятся технологические процессы сборки ЧЭ [5]. Принципы соединения кремниевого кристалла с другими элементами конструкции зависят от материала, из которого они выполнены. Как правило, для объемных микромеханических акселерометров ЧЭ представляют собой конструкции из чередующихся слоев кремния и стекла (рис. 3), соединение осуществляется методом анодной или электростатической сварки [6, 7]. Метод основан на ионизации содержащихся в стекле молекул натрия под действием высокой температуры в сочетании с постоянной отрицательной разностью потенциалов, прикладываемой к внешним поверхностям стекла и кремния при одновременном механическом поджатии пластин друг к другу. При использовании электростатического соединения необходимо помнить о влиянии контактных деформаций на метрологические характеристики акселерометра. Здесь приемлемы компромиссные решения, основанные на минимизации площадей контактов при одновременном обеспечении требуемой прочности соединения.

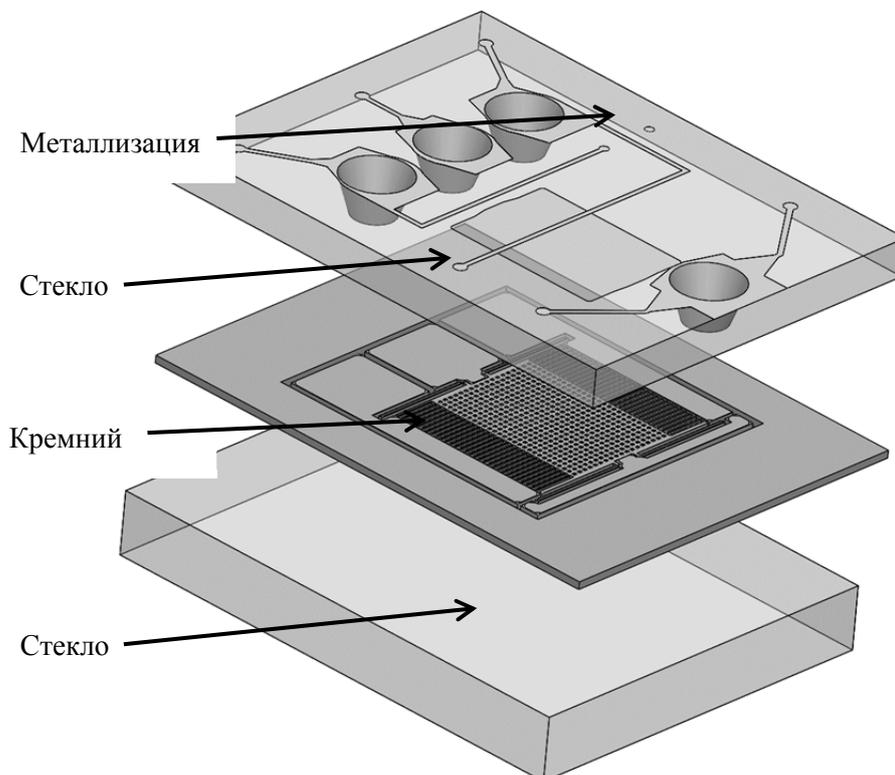


Рис. 3. Детали ЧЭ объемного микромеханического акселерометра

Для предварительной оценки будущего изделия АО «НИИФИ» успешно применяет методы современных CALS-технологий [8], т.е. технологию имитационного моделирования в CAE-программах. Эта технология позволяет провести расчет влияния внешних воздействующих факторов на конструкцию будущего изделия. В данном случае был использован модальный и статический анализы программы ANSYS [9].

Предварительные аналитические расчеты показали [10], что при жесткости упругих подвесов 7,27 и массе равной $1,768 \cdot 10^{-7}$ расчетная величина резонансной частоты равна

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{7,27}{1,77 \cdot 10^{-7}}} = 1019,1 \text{ Гц.}$$

Сравнивая это расчетное значение со значением резонансной частоты, полученной в результате проведения модального анализа, которая составляет 992,21 Гц (рис. 4), получаем, что погрешность расчета составляет $\sim 2,8\%$, что является допустимым значением.

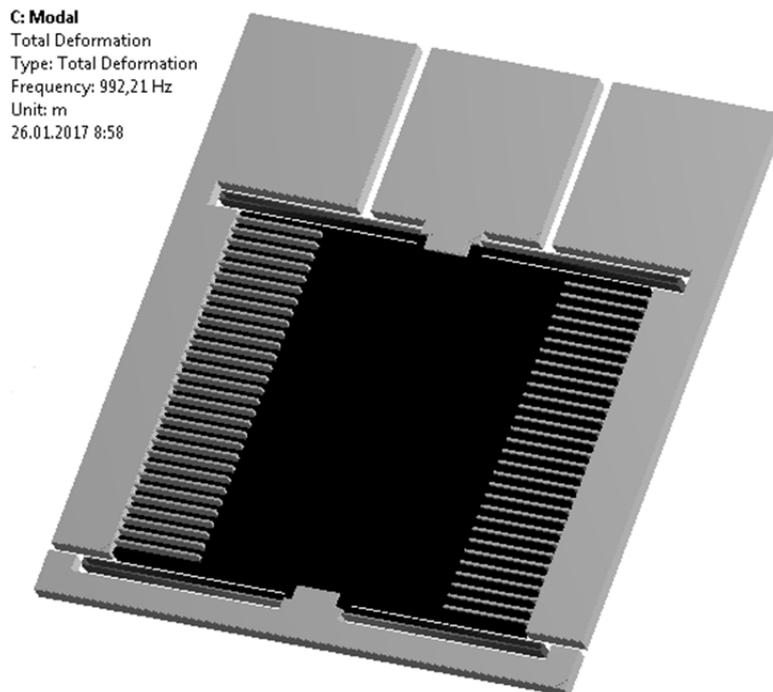


Рис. 4. Мода колебаний, совпадающая с направлением перемещения инерционной массы в процессе работы и соответствующая частоте 992,21 Гц

Далее рассчитываем относительный коэффициент демпфирования, необходимый для более точного определения перемещения инерционного элемента под воздействием внешних сил.

Относительный коэффициент демпфирования рассчитываем по формуле

$$\varepsilon = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}; \quad b = n\mu \frac{h^3 a}{d^3},$$

где b – абсолютный коэффициент демпфирования; M – масса инерционного элемента; k – жесткость упругого подвеса; n – количество пар гребенок; μ – вязкость среды (воздуха); h , a – высота и длина зуба; d – зазор между обкладками (между гребенками).

Получаем относительный коэффициент демпфирования, равный 0,015, и используем его при расчете перемещения инерционной массы под воздействием нагрузки.

Проведение статического анализа воздействия на чувствительный элемент ускорения 200 м/с^2 (рис. 5) позволило определить максимальное (с учетом демпфирования) перемещение, которое равно 3,8 мкм.

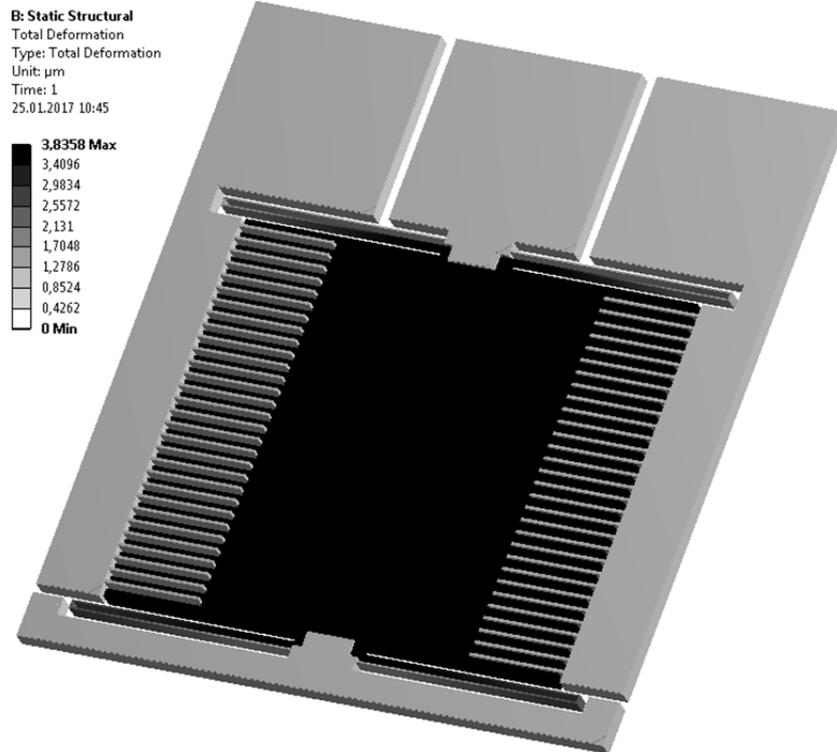


Рис. 5. Эпюра перемещения инерционной массы под воздействием ускорения 200 м/с^2

Полученные результаты показывают высокую точность имитационного моделирования и позволяют дать предварительную оценку работоспособности рассмотренной конструкции. Использование CALS-технологий в процессе проектирования МЭМС позволяет быстро и с высоким уровнем точности оценить предполагаемую работу будущего изделия. Результаты моделирования будут использоваться на следующих этапах разработки МЭМС-акселерометра и сравниваться с результатами экспериментов после изготовления опытного образца, что позволит оценить точность выполненных расчетов и при необходимости усовершенствовать конструкцию для получения наилучших выходных характеристик датчика.

Библиографический список

1. Урманов, Д. М. Концепция развития производства МЭМС-изделий в России на период до 2017 г. / Д. М. Урманов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 65
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. Beeby, S. MEMS Mechanical Sensors / S. Beeby, G. Ensell, M. Kraft, N. White. – Norwood : Artech House Inc., 2004. – 269 с.
4. Коноплев, Б. Г. Компоненты микросистемной техники / Б. Г. Коноплев, И. Е. Лысенко. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Ч. 1. – 117 с.
5. Варадан, В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
6. Dziuban, J. A. Bonding in Microsystem Technology / J. A. Dziuban. – Netherlands : Springer, 2006. – 331 с.
7. Блинов, А. В. Интегральный датчик давления, ускорения, температуры на базе МЭМС-технологий / А. В. Блинов, А. Е. Мишанин, С. А. Москалев, И. В. Ползунов // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 10.
8. Дмитриенко, А. Г. Центр проектирования унифицированных микроэлектронных датчиков для работы в особо жестких условиях эксплуатации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, И. Н. Барин, Р. Ш. Мусаев // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 43.
9. Баранов, А. С. Повышение прочностных и эксплуатационных характеристик системы телеметрии посредством проведения имитационного моделирования механического

- удара / А. С. Баранов, М. А. Фролов, Р. Ш. Мусаев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 88.
10. Gad-el-Hak, M. The MEMS Handbook. MEMS Applications / M. Gad-el-Hak. – Boca Raton : Taylor & Francis Group, LLC, 2006. – 547 с.

Баранов Александр Сергеевич

аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Kamitte11@gmail.com

Baranov Aleksandr Sergeevich

postgraduate student, engineer-constructor,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 531.768.004.9

Баранов, А. С.

Современные технологии проектирования микроэлектромеханических систем / А. С. Баранов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 49–54.
DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-7.