

УДК 531.768

## Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров

Е. В. Ветрова, И. П. Смирнов, Д. В. Козлов<sup>1</sup>, В. М. Запетляев

<sup>1</sup>к. т. н.,

АО «Российские космические системы»

e-mail: design-centre@spacecorp.ru

**Аннотация.** Статья посвящена обзору разработанных вариантов маятниковых акселерометров на основе чувствительных элементов из кварца и кремния (емкостный кремниевый и компенсационный кварцевый маятники), полученных методами групповой объемной микрообработки. Рассмотрены особенности технологии изготовления чувствительных элементов, в частности жидкостное травление кремния и кварца. Проведен анализ конструктивно-технологических проблем, связанных с особенностями материалов изготовления и процессов глубинного жидкостного анизотропного и изотропного травления. Особое внимание уделено особенностям изготовления торсионных элементов, от точности которых зависят выходные характеристики устройства в целом. В программном комплексе SolidWorks Simulation проведено моделирование параметров деформации и жесткости подвижных частей маятников. Результаты моделирования показали, что с помощью варьирования геометрии торсиона можно подобрать необходимые параметры жесткости сочленения в широком диапазоне. Определены наилучшие параметры обработки материалов чувствительных элементов. Отличительная особенность разработанных технологий изготовления чувствительных элементов акселерометров двух типов — их групповой характер. Исследование образцов, проведенное на растровом электронном микроскопе, позволило определить геометрические параметры торсионов чувствительных элементов, от которых главным образом зависела жесткость конструкции и, как следствие, чувствительность акселерометра.

**Ключевые слова:** акселерометр, кварцевый маятник, кремниевый маятник, групповая технология

## Design Features of Sensitive Elements for Quartz and Silicon Pendulum Accelerometers

E. V. Vetrova, I. P. Smirnov, D. V. Kozlov<sup>1</sup>, V. V. Zapetlyayev

<sup>1</sup>candidate of engineering science,

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: design-centre@spacecorp.ru

**Abstract.** The article presents the review of the developed variants of pendulum accelerometers based on sensitive elements made of quartz and silicon (capacitive silicon and compensation quartz pendula) obtained by means of batch volume processing. The features of the technology for producing sensitive elements, in particular liquid etching of silicon and quartz, are given. The paper shows the analysis of the design and technological problems connected with the characteristics of the materials of production and process of the deep liquid anisotropic and isotrope etching. A special attention is given to the design features of torsional elements, because, in general, the output characteristics of the device depend on the production accuracy of such elements. Simulation of the deformation parameters and stiffness of the movable parts of the pendula was carried out in the SolidWorks Simulation program complex. The simulation results showed that it is possible to choose the necessary parameters of stiffness of the joint in a wide range by changing the geometry of the torsion bar. The best parameters for materials processing of the sensitive elements were determined. A distinctive feature of the developed technologies for producing sensitive elements of two types of accelerometers is their group character. A study of the produced samples carried out on the scanning electron microscope made it possible to determine the geometric parameters of the torsion bars of the sensitive elements. The stiffness of the structure and consequently the sensitivity of the accelerometer depended mainly on those parameters.

**Keywords:** accelerometer, quartz pendulum, silicon pendulum, batch technology

В настоящее время создается множество типов микромеханических датчиков на основе кремниевой и кварцевой технологий: акселерометры, датчики давления, мультисенсорные датчики, которые находят применение в системах навигации ракетно-космической и авиационной техники. Мультисенсорные датчики представляют собой такие микромеханические устройства, которые позволяют одновременно измерять несколько параметров, например линейные ускорения и угловую скорость. Использование микромеханических акселерометров в мультисенсорном режиме дает возможность построения широкой гаммы приборов для систем навигации и управления объектами. Одно из перспективных направлений развития датчиков лежит в области маятниковых акселерометров, в которых чувствительный элемент сделан из кремния или кварца. Конструктивная схема обоих чувствительных элементов состоит из рамки, установочных площадок, упругих торсионных подвесов и лопасти. Ключевое значение имеет выбор материала для чувствительного элемента, так как от физических характеристик материалов маятников зависят основные параметры акселерометра [1–3]. Например, кварц и кремний имеют разные значения температурного коэффициента расширения, который влияет на прочностные характеристики и играет роль при помещении маятника в корпус акселерометра. Более подробное описание свойств материалов приведено в таблице 1 [4].

Таблица 1. Физические характеристики кварца и кремния

Физическая характеристика	Кварцевый маятник	Кремниевый маятник
Модуль Юнга, ГПа	107	160
Теплопроводность, Вт/(°С·м)	1,38	157
ТКР, 1/°С	$0,55 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
Тип электропроводности	Диэлектрик	Полупроводник
Технологичность	Низкая	Высокая

Маятник из монокристаллического кремния может быть изготовлен из стандартных заготовок методами, хорошо освоенными электронной

промышленностью. Кварцевые маятники до последнего времени изготавливались индивидуально из специальных заготовок и потому были дороги.

Кремниевые маятники уступают кварцевым в точностных характеристиках, однако кремний более технологичный и дешевый материал, позволяющий получить более дешевую продукцию при высокой воспроизводимости параметров [5].

В статье рассматриваются два типа чувствительных элементов акселерометра: емкостный кремниевый и компенсационный кварцевый маятники.

Принцип действия емкостного кремниевого маятникового акселерометра основан на преобразовании механического воздействия в электрический сигнал, который формируется за счет изменения емкости между обкладками — маятником и статорной пластиной вследствие внешнего воздействующего ускорения. Конструкция маятника состоит из рамки, контактных площадок, двух встречно расположенных балок, закрепленных по центральной оси на крутильных торсионах, и термокомпенсаторов, предназначенных для защиты акселерометра от напряжений, возникающих вследствие разницы коэффициентов температурного линейного расширения статорного и подвижного элементов. Торсионы расположены парами соосно в плоскости балок, что обеспечивает угловое отклонение элементов вдоль оси торсиона. На одном из плеч каждой балки организована чувствительная масса путем удаления части материала.

Для формирования структуры чувствительного элемента (рис. 1) был выбран метод жидкостного анизотропного травления кремния, отличающийся простотой, высокой скоростью формирования объемной структуры и возможностью формирования стенок различного наклона (в том числе вертикальных).

Существует несколько составов анизотропных травителей монокристаллического кремния, обладающих общим свойством травления кремниевого кристалла в направлениях (100) и (110) быстрее, чем в направлении (111). Это связано с различной плотностью упаковки атомов кремния в кристаллической решетке по этим направлениям. При травлении плоскости (100) удаление атомов с поверхности идет быстрее, чем с плоскости (111) (см. табл. 2) [6].

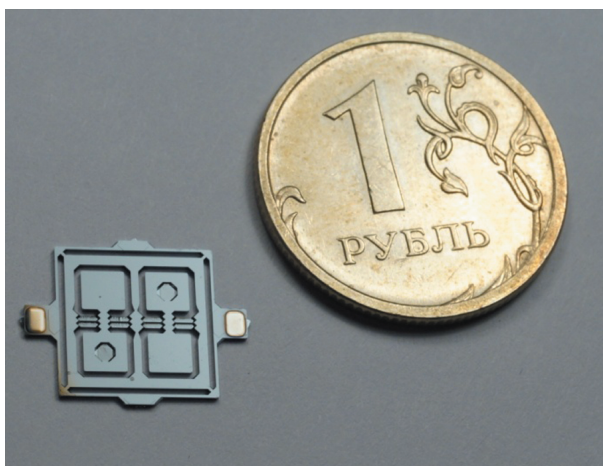


Рис. 1. Внешний вид кремниевого чувствительного элемента маятникового акселерометра

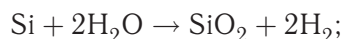
Таблица 2. Характеристики различных травильных реагентов, применяемых для анизотропного жидкостного травления монокристаллического кремния

Травильный агент	Температура	Скорость травления кремния, мкм/ч		
		(100)*	(110)*	(111)*
КОН : H <sub>2</sub> O	80	84	126	0,21
КОН	75	25–42	39–66	0,5
EDP	110	51	57	1,25
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> O	118	176	99	11
N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH	75	24	8	1

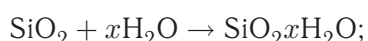
\* — ориентация кристаллов

Анизотропное химическое травление кремния в КОН происходит в 3 стадии:

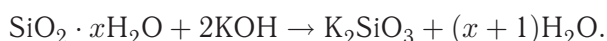
1) окислительно-восстановительная реакция:



2) гидратация оксида:



3) растворение гидратированного оксида:



В результате локального анизотропного травления образуется объемная фигура травления, конфигурация которой определяется:

- 1) ориентацией исходной пластины кремния;
- 2) формой маски для локального травления;
- 3) ориентацией маски на поверхности пластины кремния;
- 4) типом анизотропного травителя;
- 5) концентрацией компонентов травителя;
- 6) температурой травителя;
- 7) временем травления.

Таким образом, учитывая разницу в скорости травления по направлениям, в результате травления пластины кремния с ориентацией (100) образуется V-образная канавка, боковые стенки которой ориентированы в плоскости (111), то есть перпендикулярны направлению, соответствующему наименьшей скорости травления (рис. 2). При малом времени травления канавка имеет плоское дно, с ростом времени она углубляется, становится V-образной. После этого травление резко замедляется (практически останавливается, так как дальше оно возможно только в направлении (111)) [7].

Одна из сложностей формирования маятниковой структуры заключается в создании вертикальных стенок торсиона маятника с минимальной степенью шероховатости. Наиболее популярный анизотропный травитель кремния — раствор КОН в воде. При травлении в растворе КОН при определенном соотношении КОН и воды при 80 °C образуется однородная и блестящая поверхность. При этом нужно учитывать влияние температуры и соотношения концентрации КОН и воды на скорость травления кремния.

В качестве материала для формирования структуры были выбраны кремниевые пластины *n*-типа с ориентацией (100) с удельным сопротивлением 4,5 Ом · см. Формирование структуры осуществлялось методом поэтапного травления кремния для получения нужной объемной структуры. Травление осуществлялось раствором КОН : H<sub>2</sub>O при температуре 80° через маску оксида кремния. Локальные отверстия в маске формировались с помощью фотолитографии.

Другая сложность формирования структуры заключалась в выполнении требования к вертикальности стенок торсиона, которая может быть обеспечена ориентацией прямолинейных сторон маски под углом 45° относительно направле-

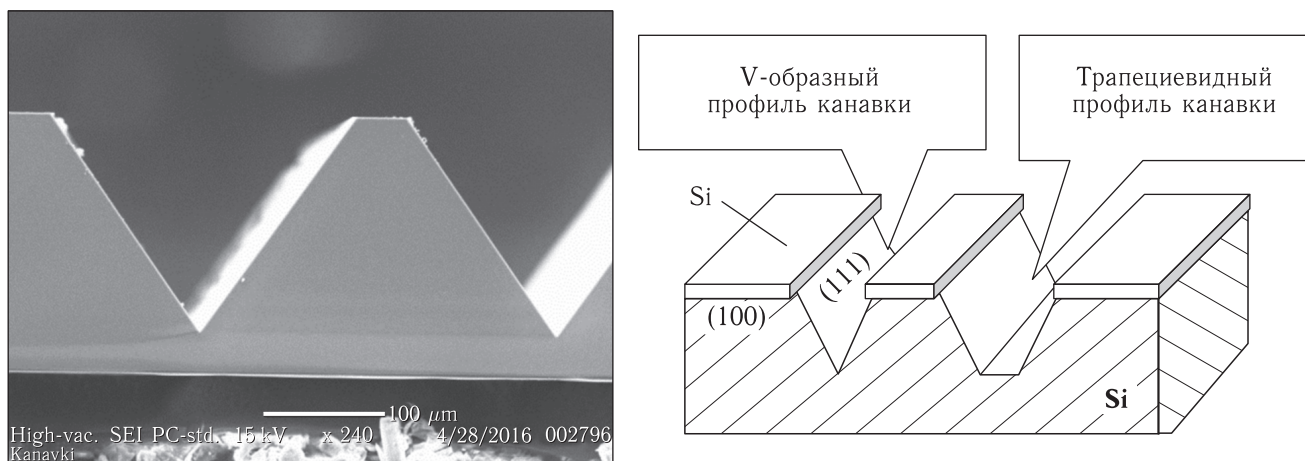


Рис. 2. V-образный профиль травления кремния

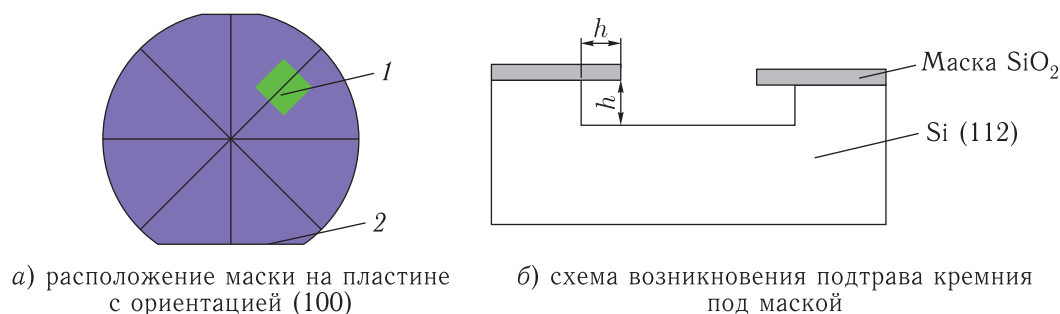


Рис. 3. Ориентация маски на пластине с ориентацией (100) для получения вертикального профиля травления (на рис. 3, а 1 — маска, 2 — базовый срез пластины)

ния [110], вдоль которого ориентирован базовый срез кремниевой пластины (рис. 3, а).

Вследствие поворота маски будет происходить подтрав кремния под маской на величину, равную глубине травления (рис. 3, б), а также подтрав внешних углов выпуклых структур. Подтрав связан с образованием на углах быстротравящихся граней типа (112). Таким образом, на фотошаблоне размеры элементов, параллельных плоскости (112), были уменьшены на величину, равную глубине растрыва (рис. 4).

В результате ряда технологических операций, включающих в себя процессы фотолитографии, химическую обработку, анизотропное жидкостное травление, была сформирована структура маятника с вертикальными торсионами заданной геометрии.

Исследование изготовленных образцов проведено на растровом электронном микроскопе, определены геометрические параметры торсиона, от которых

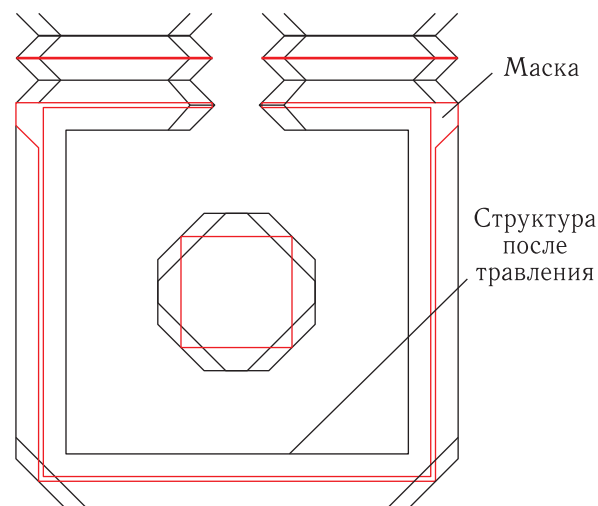


Рис. 4. Фрагмент рисунка маски фотошаблона

зависела жесткость конструкции и, как следствие, чувствительность акселерометра (рис. 5).



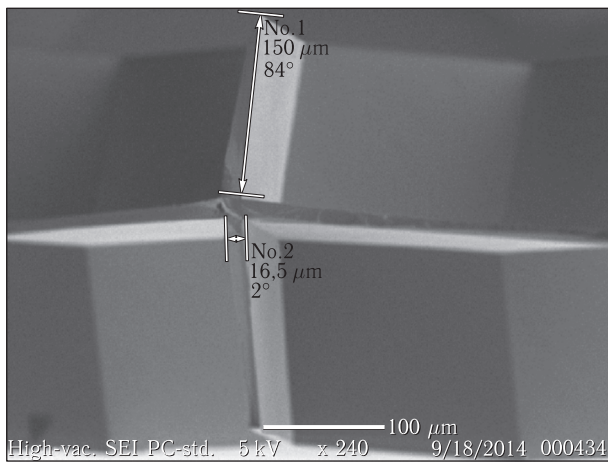


Рис. 5. Поперечный вид торсиона в сканирующем электронном микроскопе

Полученные образцы выламывались из пластины (рис. 6, а) и методом анодного сращивания устанавливались на статорную пластину (рис. 6, б), с помощью которой осуществляется определение электрических параметров.

Для проведения оценочного расчета жесткости торсионных упругих элементов балки и рамки в качестве исходных данных использовали экспериментальные характеристики изготовленных ранее термомеханических структур [8,9] (рис. 7). Расчет проводили в программной среде SolidWorks Simulation.

Геометрия кремниевого торсиона была взята из конструкторской документации на кремниевый маятник. Перемещение и внутренние напряжения рассчитывались при жестком закреплении рамки с двух сторон и при воздействии силы тяжести. Таким образом, при воздействии на чувствительный элемент ускорения 1 g и длине торсиона 1,835 мм перемещение хвостовика составило величину 0,267 мкм, а максимальное напряжение, сконцентрированное в крестообразном торсионном элементе —  $3,55 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> при известном пределе текучести кремния  $1,2 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup>, что свидетельствует о неразрушающем характере возникших деформаций.

Результаты моделирования показывают, что с помощью варьирования геометрий торсиона можно подобрать необходимые параметры жесткости сочленения в достаточно широком диапазоне, ограниченном лишь габаритами кремниевой пластины, на которой выполняются элементы системы.

Отличительной особенностью данной конструкции будут небольшие перемещения «подвешенного» элемента (до десятых долей миллиметра в месте сочленения с торсионом) и высокая жесткость конструкции.

Также была проведена работа по разработке технологии изготовления чувствительного элемента маятника из кварца. Оригинальность решения состоит в групповом методе изготовления и отсутствии механической обработки кварцевой кристаллической пластины, что способствует увеличению точности прибора. Традиционный метод состоит в ручном нанесении воско-канифольной мастики кистью в места травления каждого маятника и последующая резка с помощью лазера.

Было разработано оригинальное технологическое решение, позволяющее осуществить групповой метод формирования структуры с помощью глубокого изотропного травления кварцевых пластин фторсодержащим травителем без использования лазерной резки. Использовались пластины кварца толщиной 0,6 мм диаметром 100 мм. При разработке топологии были учтены подтравы кварца под маской из хрома и меди на величину, равную глубине травления. При этом большую роль играла величина неравномерности по толщине пластины, при изотропном травлении приводящая к непредсказуемому значительному уходу линейных размеров. Недостаток технологии — невозможность избежать образования ямок травления на поверхности из-за дефектности защитной маски.

Было проведено исследование характеристик жесткости упругих элементов в среде SolidWorks Simulation. Результаты расчета жесткости подвижной части маятника при воздействии ускорения 1 g, толщине 20 мкм и различной длине упругого подвеса приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета жесткости упругих элементов

Длина упругого подвеса, мм	2,0	2,1
Отклонение подвижной части от горизонтали, мм	0,491	0,507
Напряжение, Н/м <sup>2</sup>	$2,035 \cdot 10^7$	$2,076 \cdot 10^7$

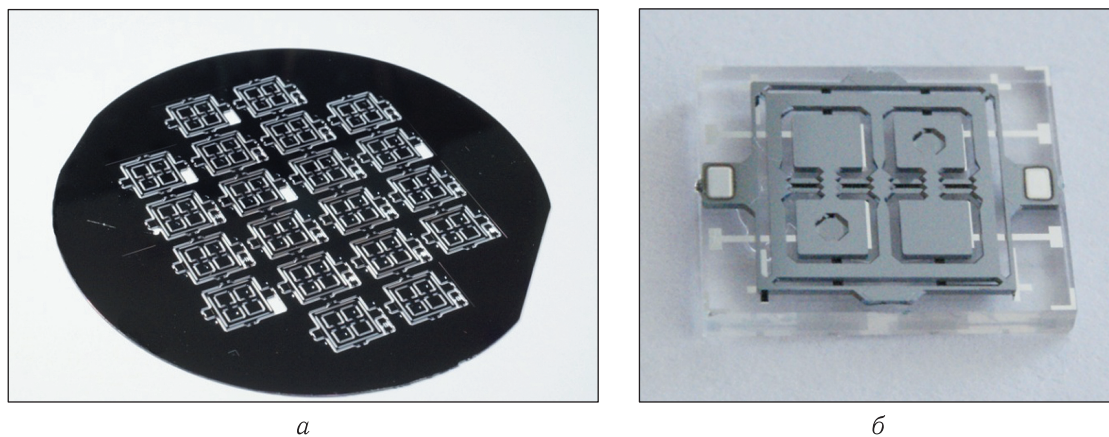


Рис. 6. Внешний вид кремниевого чувствительного элемента маятника: а) на пластине; б) общий вид

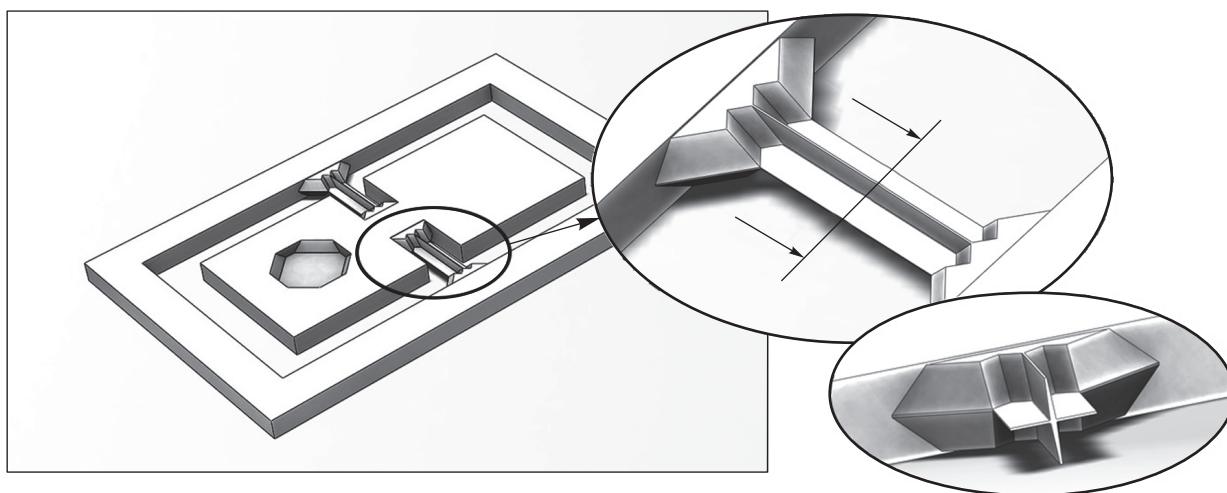


Рис. 7. Конструкция кремниевых торсионов

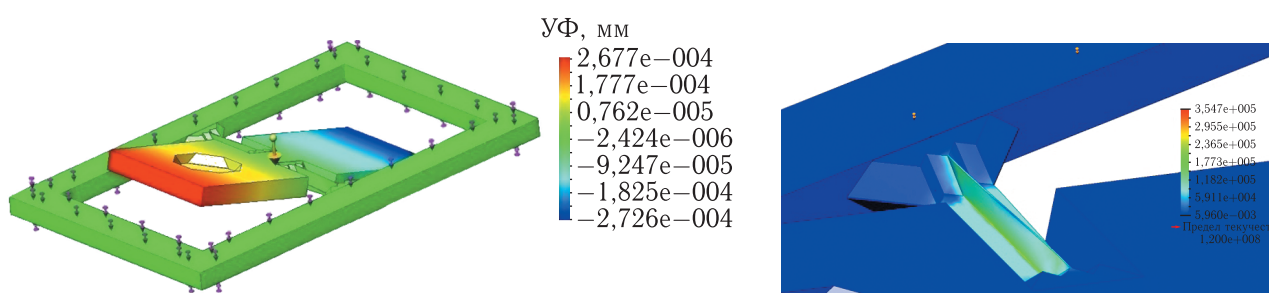


Рис. 8. Результаты моделирования кремниевого торсиона

На рис. 10 и 11 показана графическая иллюстрация произведенных расчетов. Красному цвету на рис. 10 соответствует максимальное отклонение подвижной части хвостовика от горизонта-

тали, которое составляет 0,491 мм при длине упругого подвеса 2,0 мм. Красному цвету на рис. 11 соответствует максимальное отклонение подвижной части хвостовика от горизонтали, которое

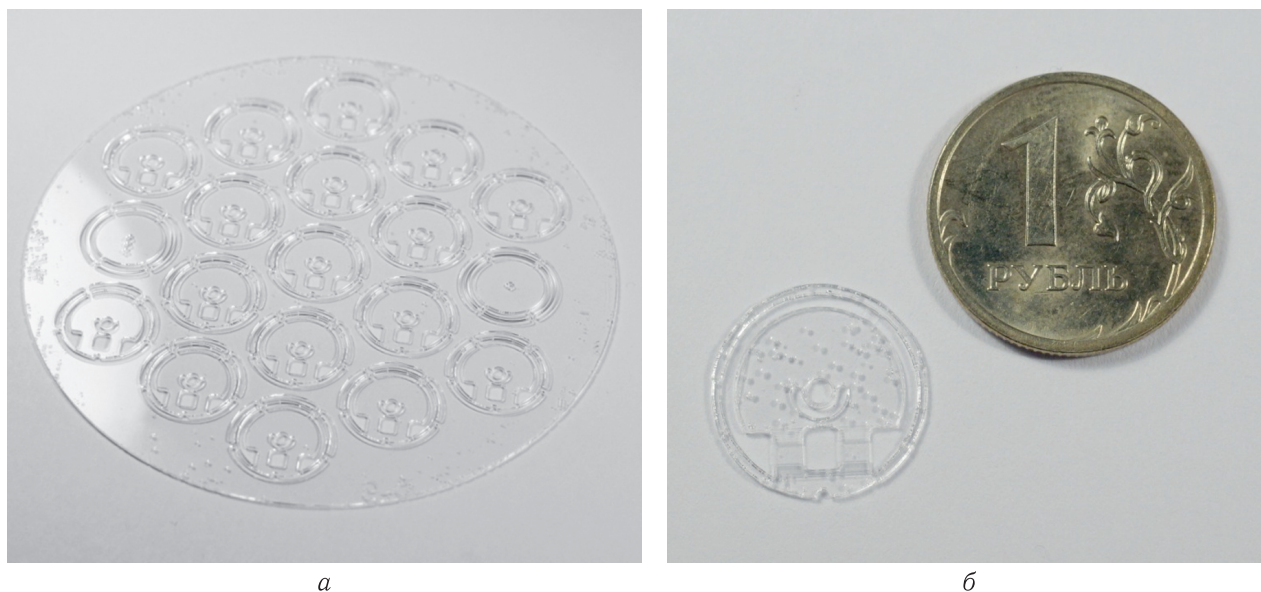


Рис. 9. Внешний вид кварцевого чувствительного элемента маятника: а) на пластине; б) общий вид

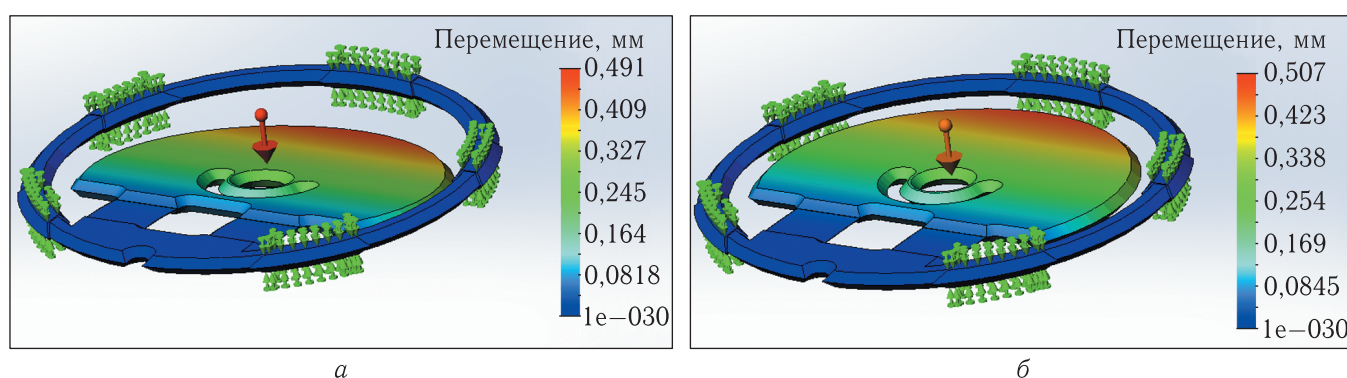


Рис. 10. Расчет отклонения хвостовика при длине упругого подвеса: а) 2,0 мм; б) 2,1 мм

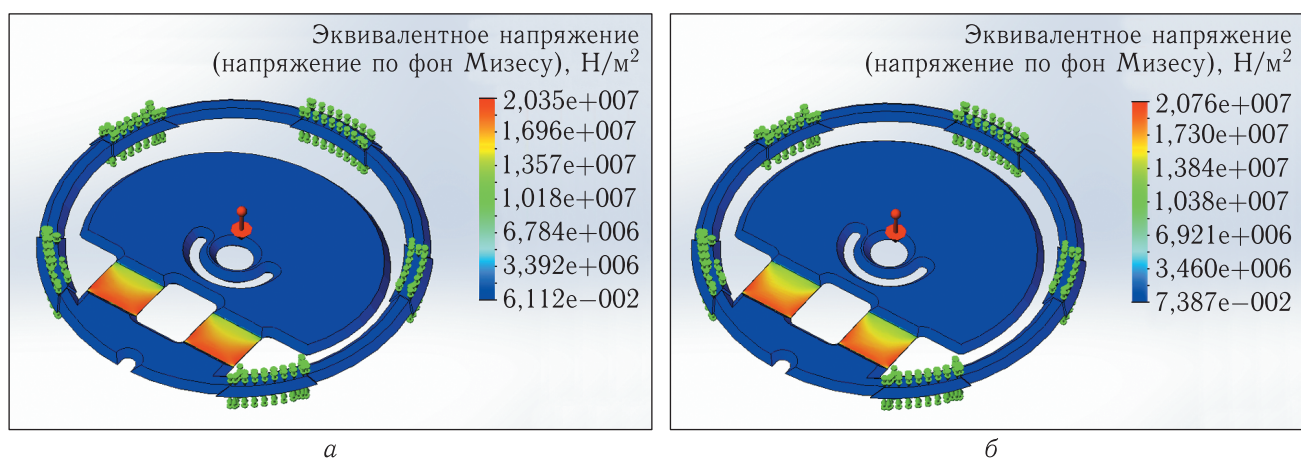


Рис. 11. Расчет напряжения упругого подвеса при длине: а) 2,0 мм; б) 2,1 мм



составляет 0,507 мм при длине упругого подвеса 2,1 мм.

Таким образом, были смоделированы параметры жесткости торсионов чувствительных элементов маятников при ускорении 1 g, показывающие большие величины отклонения хвостовика кварцевого маятника и большие упругие напряжения, чем у кремниевого. Исследовано влияние технологических особенностей изготовления на геометрию топологических слоев и определены наилучшие параметры обработки материалов чувствительных элементов. Разработана оригинальная групповая технология изготовления кварцевого маятника на пластине диаметром 100 мм. Отработана технология изготовления кремниевого маятника на пластине 100 мм с торсиона с крестообразным торсионом толщиной порядка 16 мкм. Разработана мелкосерийная технология изготовления чувствительного элемента акселерометра двух типов.

## Список литературы

1. Коновалов С.Ф., Коновченко А.А., Межирицкий Е.Л. Компенсационный Si-flex акселерометр для измерения больших ускорений // Гироскопия и навигация, 2006, № 2. С. 44–51. ISSN 0869-7035.
2. Peters R.B., Stoddard D.R., Meredith K. Development of a 125 g Quartz Flexure Accelerometer for the RIMU Program // AlliedSignal Electronic and Avionics Systems. Communication and Sensor Systems. IEEE, 1998, № 1. P. 17–24.
3. Коновалов С.Ф., Полинков А.В., Сео Дж.Б. и др. Опыт разработки малошумящего акселерометра // Доклад на VII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб., 2000. С. 72–79.
4. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976.
5. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока // Системотехника: Системные проблемы надежности, качества и информационных технологий, 2012.
6. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004.
7. Иващенко Е.И., Цветков Ю.Б. Метод размерного стоп-травления кремния в производстве изделий микромеханики // Нано- и микросистемная техника. М.: Новые технологии, 2000.
8. Козлов Д.В., Смирнов И.П., Жуков А.А., Болотник Н.Н. Микромеханические компоненты микроробототехнических устройств космического назначения // Нано- и микросистемная техника, 2017, № 3. С. 173–180.
9. Козлов Д.В., Смирнов И.П. Технические аспекты создания гибких элементов-связок для использования в устройствах микроробототехники // XV Международная научно-практическая конференция «Техника и технология: новые перспективы развития». М., 2014. С. 179–184.