

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ



Микромеханические акселерометры (ММА) широко применяются в космических аппаратах, авиации, автомобилестроении, высокоточном оружии – управляемых ракетных и артиллерийских снарядах [1, 2]. Акселерометры с малым диапазоном измерения используются для измерений углов наклона приборов, выходной сигнал акселерометра пропорционален синусу угла наклона по отношению к горизонту [3]. Один из важнейших элементов конструкции микромеханических акселерометров – подвесы (торсионы), их форма и размеры определяют важный параметр микроприборов – чувствительность. По результатам моделирования подвесов различной формы была выбрана оптимальная конструкция подвесов и изготовлены действующие макетные образцы микроприборов.

При конструировании ММА маятникового типа имеются большие возможности варьирования формы и размеров чувствительного элемента, а также его подвесов (торсионов). Для изготовления чувствительного элемента (ЧЭ) и торсионов используется монокристаллический кремний, например марки КЭФ-4,5 (100), обладающий необходимыми механическими свойствами. Технологии обработки кремниевых пластин достаточно развиты и позволяют получать требуемые формы и размеры элементов конструкции [4].

Проведен расчет влияния внешних статических механических возмущений на значения максимального напряжения в торсионах ММА с сечением различной конфигурации, и с учетом этих результатов разработана конструкция ММА.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДВЕСОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Метод конечных элементов – один из численных методов, позволяющий представить сложный объект или систему в виде набора простых элементов. Анализ торсионов различной конфигурации проводился методом компьютерного моделирования в среде ANSYS [5], которая представляет собой набор программных пакетов, предназначенных для решения обширного класса задач методом конечных элементов. Был проведен анализ

А.Бойко, к.т.н.; А.Заводяна, к.т.н.; Б.Симонов, к.т.н.

статического напряженно-деформированного состояния подвесов различной конфигурации при развороте подвижной части на заданный угол без учета внешних механических возмущений и с учетом влияния внешних статических механических возмущений, а также моделирование и анализ форм колебаний и собственных частот колебаний микроакселерометра с подвесами, имеющими различную форму поперечного сечения.

При создании модели в среде ANSYS были использованы следующие математические соотношения.

Напряжение связано с деформацией выражением:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon^{el}\},$$

где $\{\sigma\} = \sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}^T$ – тензор напряжения; $[D]$ – матрица жесткости, обратная матрице (1); $\{\epsilon^{el}\} = \{\epsilon\} - \{\epsilon^{th}\}$ – вектор упругой деформации; $\{\epsilon\} = \epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z \epsilon_{xy} \epsilon_{yz} \epsilon_{xz}^T$ – суммарный вектор деформации; $\{\epsilon^{th}\}$ – вектор термической деформации.

В случае объемной модели:

$$\{\epsilon^{th}\} = \Delta T \begin{bmatrix} \alpha_x^{se} & \alpha_y^{se} & \alpha_z^{se} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

где α_x^{se} , α_y^{se} , α_z^{se} – линейные коэффициенты термического расширения в направлениях x , y , z соответственно.

Матрица податливости $[D]^{-1}$ может быть записана в виде

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_{xy}/E_x & -\nu_{xz}/E_x & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{yx}/E_y & 1/E_y & -\nu_{yz}/E_y & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{zx}/E_z & -\nu_{zy}/E_z & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{xz} \end{bmatrix},$$

где E_x , E_y , E_z , – значения модуля Юнга в направлениях x , y , z соответственно; ν_{xy} , ν_{yx} , ν_{xz} , ν_{zx} , ν_{yz} , ν_{zy} – коэффициенты Пуассона; G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} – значения модуля сдвига в плоскостях xy , yz , xz , соответственно. Предполагается, что матрица $[D]^{-1}$ симметрична.

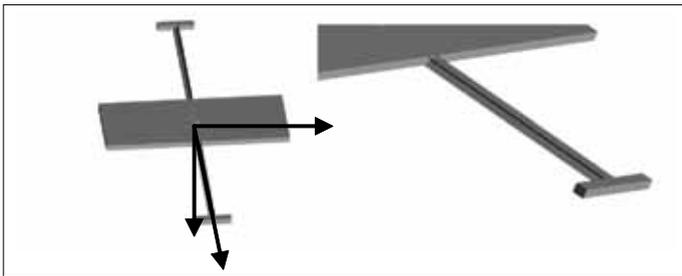


Рис. 1. Схематическое изображение чувствительного элемента с торсионами

Для определения компонентов тензора деформации вводится система осей (рис.1). Оси параллельны главным осям подвижной части ММА и необходимы для задания направлений при определении компонентов тензора деформаций. Условимся, что центр системы координат OXYZ может находиться в центре массы сечения любого из торсионов (при этом направления осей сохраняются).

В расчетах длина каждого торсиона принималась равной 1,5 мм. Сечения торсионов (крестообразное, круглое и прямоугольное) выбраны таким образом, чтобы жесткость на кручение всех торсионов была одинаковой (рис.2).

Конструкция чувствительного элемента (ЧЭ) для ММА с крестообразным сечением торсионов представлена на рис.3а. ЧЭ представляет собой маятник (флажок), асимметрично подвешенный на двух упругих балках (торсионах) к рамке. Принцип действия ЧЭ основан на несимметричном подвесе подвижной рамки, благодаря чему осуществляется регистрация силы ускорения, направленной перпендикулярно плоскости ЧЭ. Для создания необходимой величины зазора между чувствительным элементом и расположенной под ним платой (рис.3б) нижняя часть рамки имеет четыре выступа, которые исключают короткое замыкание емкостных датчиков при повороте подвижной рамки в любое крайнее положение. На другой стороне маятника какой-либо рельеф отсутствует, т.е. поверхности основания и подвижной рамки находятся в одной плоскости.

Исследовалось напряженно-деформируемое состояние торсионов при нагружении подвижного элемента ММА моментом силы $6,5 \cdot 10^{-5}$ Н·м, что соответствует повороту его

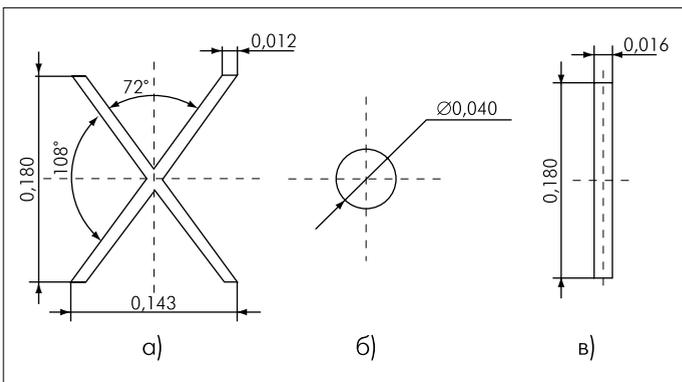


Рис.2. Сечения торсионов: крестообразного (а); круглого (б); прямоугольного (в)

подвижной части на угол 34,4 угл. мин. Для небольших углов поворота подвижной части микромеханического акселерометра в пределах нескольких градусов угол поворота будет пропорционален приложенному к нему моменту силы.

В результате моделирования получены значения максимальных напряжений в торсионах с сечением крестообразной, круглой и прямоугольной форм при повороте на заданный угол, составившие соответственно $4,86 \cdot 10^6$ и $2,75 \cdot 10^6$ Па [6, 7].

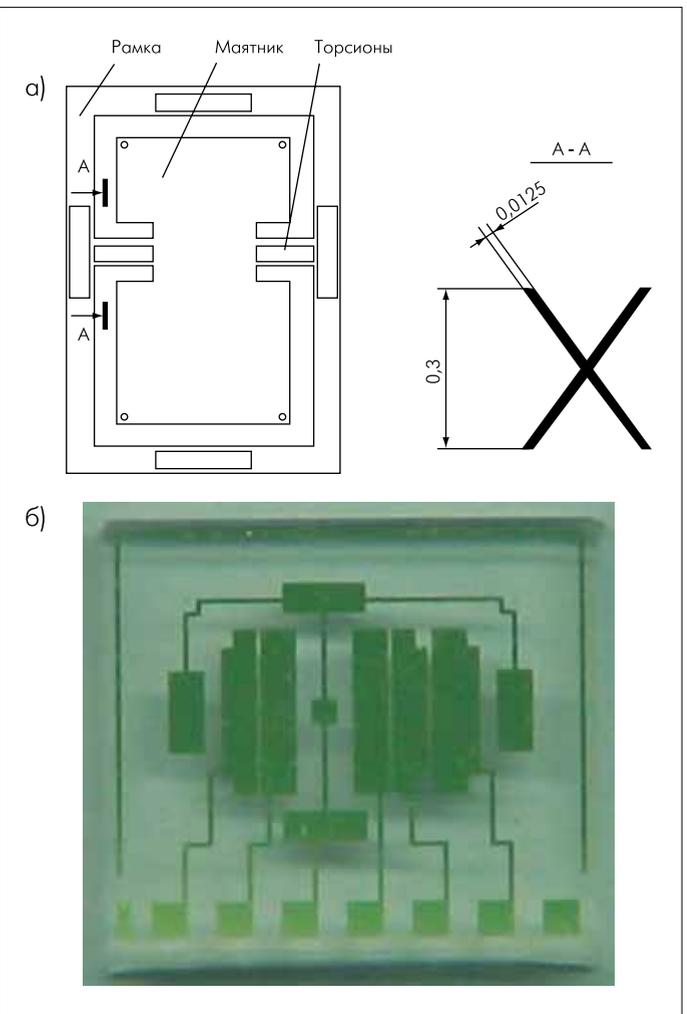


Рис.3. Конструкция чувствительного элемента акселерометра с крестообразным сечением торсионов (а), фотография платы (б)

Выполнен расчет максимальных напряжений в торсионах ММА с сечением различной конфигурации, возникающих под воздействием внешних статических механических возмущений (табл.1). Моделировалось приложение ускорения 1 g поочередно по трем осям на торсионы с различной формой сечения.

Первая мода для всех разновидностей исследованных торсионов является рабочей, все остальные — паразитные. Результаты моделирования и анализа колебаний на различных модах, расчет собственных частот микроакселерометра с подвесами различной конфигурации приведены в табл.2.

Из приведенных данных видно, что погрешности, возникающие за счет движения по паразитным степеням свобо-

Таблица 1. Результаты расчетов по определению влияния внешних статических механических возмущений на максимальное напряжение в торсионах

Исходное условие для расчета	Максимальное напряжение в торсионах с различной формой сечения, Па		
	крест	круг	прямоугольник
Поворот подвижной части на угол 34,4 угл. мин	$4,86 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^6$	$2,75 \cdot 10^6$
Приложение ускорения 1 g по оси X	$2,15 \cdot 10^5$	$3,42 \cdot 10^6$	$3,24 \cdot 10^5$
Приложение ускорения 1 g по оси Y	$3,3 \cdot 10^5$	$3,32 \cdot 10^6$	$3,45 \cdot 10^6$
Приложение ускорения 1 g по оси Z	$5,07 \cdot 10^3$	$2,42 \cdot 10^6$	$7,6 \cdot 10^3$

Таблица 2. Собственные частоты колебаний подвесов

Мода колебаний	Собственная частота колебаний ЧЭ с торсионами различной формы сечения, Гц		
	крест	круг	прямоугольник
I	221	279	216
II	2100	452	231
III	2830	453	406
IV	3940	847	2340
V	14000	2200	11600

ды, минимальны для торсионов с крестообразным сечением. Это связано с тем, что собственные частоты по паразитным степеням свободы значительно превышают собственную частоту по "рабочей" степени свободы (т.е. паразитные степени свободы более "жесткие"). Для "круглого" и "прямоугольного" торсионов паразитные частоты близки к частоте колебаний по первой моде.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Конструкция ЧЭ ММА (рис.3а) разработана в соответствии с результатами выполненных расчетов и предъявленными требованиями. Она характеризуется следующими значениями параметров: размер флажка акселерометра 5×3 мм; зазор между флажком и емкостным датчиком равен $9,5 \pm 1$ мкм; флажок имеет четыре симметричных упора по углам маятника высотой 10 ± 1 мкм; расчетная жесткость упругих перемычек маятника обеспечивает касание упоров при действии линейного ускорения величиной 2 g; датчик выдерживает удар величиной до 125 g.

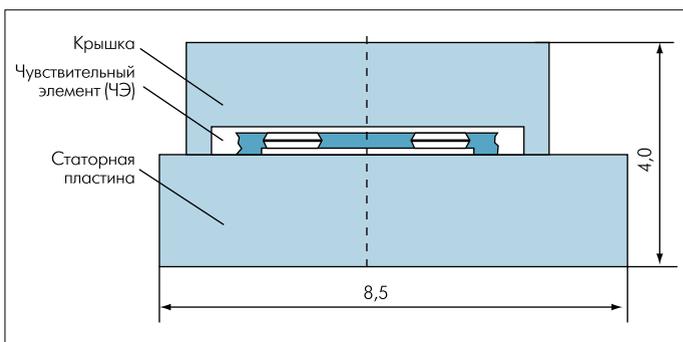


Рис.4. Структура чипа микромеханического акселерометра после его сборки

Структура чипа ММА имеет вид, представленный на рис.4.

Чувствительный элемент присоединен к статорной пластине эвтектической пайкой Si-Au. Собранный чип размещался и герметизировался в стандартном металлостеклянном корпусе с помощью разработанной технологии герметизации, обеспечивающей создание вакуума внутри корпуса на уровне $10^{-1} - 10^{-3}$ мм рт. ст. (рис.5) [8].

Снижение давления в корпусе позволяет уменьшить влияние газового демпфирования на чувствительный элемент и добиться требуемых частотных свойств микроакселерометра. Для увеличения срока службы микроприборов и стабилизации параметров разработанная технология предусматривает исполь-

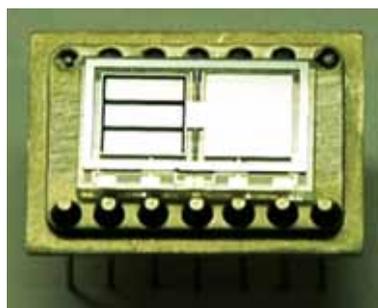


Рис.5. Чувствительный элемент ММА в корпусе

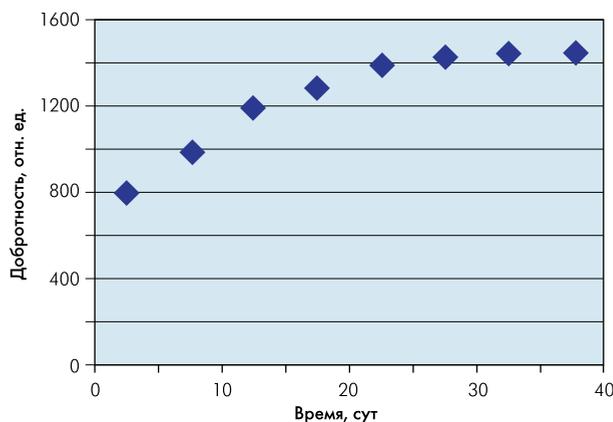


Рис.6. Изменение добротности чувствительного элемента во времени после использования газопоглотителя

зование газопоглотителей различного типа. Эксперименты по применению газопоглотителей на основе Ti и сплава Ti-Va показали эффективность их использования, добротность микромеханических элементов со временем возрастает (рис.6). Здесь следует отметить, что колебание чувствительного элемента микроакселерометра возможно только при наличии вакуума в корпусе. При давлении выше 1 мм рт. ст. из-за газового демпфирования добротность становится равной нулю.

Полученные результаты численного моделирования торсионов с различным сечением (см. табл.1, 2) позволяют сделать следующие выводы.

Максимальные механические напряжения, возникающие при развороте микроакселерометра на заданный угол, в тор-

сионах с крестообразным, круглым и прямоугольным сечениями различаются незначительно.

Максимальные механические напряжения при воздействии внешних статических нагрузок имеют наименьшие значения в торсионе с крестообразным сечением.

В целом торсион с крестообразным сечением является наилучшим с точки зрения помехоустойчивости по сравнению с торсионами, имеющими прямоугольное и круглое сечения.

Исследования параметров и характеристик изготовленных образцов показали их хорошее соответствие результатам расчетов. Изготовлены макетные образцы микроприборов с использованием технологии герметизации в металлостеклянных корпусах, которая обеспечивает создание вакуума внутри корпуса на уровне 10^{-1} – 10^{-3} мм рт. ст. Эксперименты по применению газопоглотителей при герметизации показали их эффективность и перспективность использования.

*Работа выполнена при поддержке гранта
Президента Российской Федерации.*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы. – Тула: Тульский госуниверситет, 2002, с. 7–95.
2. **Мокров Е.А.** Интегральные датчики. Состояние разработок и производства. Направления развития, объемы рынка. – Датчики и системы, 2000, № 1, с. 28–30.
3. **Пешехонов В.Г.** Ключевые задачи современной автономной навигации. – Гироскопия и навигация, 1996, № 1, с. 48–55.
4. **Бритков О.М.** Разработка конструкции микро-механического акселерометра / 12 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов "Микроэлектроника и информатика – 2005". – М.: МИЭТ, 2005, с. 123.
5. www.ansys.com
6. **Зотов С.А.** Расчет формы деформируемой балки микромеханического акселерометра. – Тула, Известия Тульского государственного университета. Сер. Проблемы специального машиностроения, 2001, вып. 4, с. 154–157.
7. **Зотов С.А., Бойко А.Н., Бритков О.М.** Косвенный анализ жесткости подвеса чувствительного элемента микромеханического устройства / "XXXI Гагаринские чтения". – М.: 2005, с. 42–43.
8. **Бойко А.Н., Калугин В.В., Симонов Б.М., Тимошенко С.П.** Исследование и разработка технологии герметизации микроэлектромеханических устройств. – Нано- и микросистемная техника, 2007, № 11, с. 53–57.