

УДК 681.2

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДРЕЙФ СОБСТВЕННЫХ  
ЧАСТОТ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

С.Е. Вторушин, А.А. Аршинова, Т.Г. Нестеренко

Томский политехнический университет

E-mail: vtorushin1991@mail.ru

**Вторушин Сергей Евгеньевич**, магистрант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: vtorushin1991@mail.ru  
Область научных интересов: микромеханические системы.

**Аршинова Алиса Андреевна**, студентка кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов ТПУ.  
E-mail: vtorushin1991@mail.ru  
Область научных интересов: моделирование микромеханических систем.

**Нестеренко Тамара Георгиевна**, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ntg@tpu.ru  
Область научных интересов: микромеханические системы.

Целью работы является определение характеристик влияния температурного воздействия на собственные частоты микромеханического гироскопа, чувствительный элемент которого расположен на кремниевой пластине с кристаллографической ориентацией (111), имеющей изотропию механических и температурных свойств во всех направлениях. Необходимость контроля метрологических характеристик, зависящих от собственных частот во всем температурном диапазоне, подтверждает актуальность данной темы исследования. В ходе исследования в среде ANSYS проведен температурно-модальный анализ модели, имитирующей первичные колебания микромеханического гироскопа. Модель микрорезонатора, выбранная в качестве имитатора первичных колебаний микромеханического гироскопа, адекватно отражает характер колебаний массы по оси первичных колебаний. В результате получены температурные зависимости собственных частот и определены наиболее температурно-независимые моды колебаний для осциллятора, выполненного на кремниевой пластине с кристаллографической ориентацией (111).

**Ключевые слова:**

Микромеханический гироскоп, микрорезонатор, монокристаллический кремний, собственные частоты, конечно-элементная модель.

Среди существующих на сегодняшний день гироскопов наиболее актуальными являются микромеханические гироскопы (ММГ) осцилляторного типа с емкостным типом детектирования полезного сигнала. Появление технологий микроэлектронной промышленности iMEMS привело к бурному развитию таких видов инерциальных датчиков, среди которых наиболее популярными являются датчики угловой скорости (ДУС) LL-типа, широко используемые в технике. Преимущества этих датчиков, вне всякого сомнения, позволяют ММГ конкурировать с традиционными гироскопами, хотя их метрологические характеристики существенно уступают последним.

Метрологические характеристики ММГ существенно зависят от материала осциллятора. Основным материалом структуры осциллятора является кремний, который обладает рядом специфических свойств, позволяющих использовать именно его. Во-первых, технология производства ММГ схожа с технологией производства интегральных микросхем, где кремний нашел свое широкое применение. Во-вторых, преимуществом кремния являются его механические свойства. Причем в качестве конструкционного материала ММГ используется монокристаллический кремний.

Кремний, как и все материалы, способен менять свои механические свойства в зависимости от температуры. Этот фактор существенным образом может оказывать влияние на характеристики ММГ. Поскольку характеристики ММГ во многом зависят от стабильности масштабного коэффициента, который обеспечивается поддержанием стабильного соотношения собственных частот конструкции, то даже небольшое отклонение собственных частот осциллятора может привести к значительному его изменению. Как известно собственные частоты кон-

струкции напрямую зависят от жесткости упругого подвеса, вследствие чего стабильность этого параметра необходимо поддерживать с высокой точностью. Аналитически собственная частота связана с жесткостью выражением [1]

$$\omega_i = \sqrt{\frac{G}{m}},$$

где  $G$  – жесткость упругого подвеса;  $m$  – инерционная масса.

Температурные воздействия приводят к дрейфу упругих характеристик кремния, изменению линейных размеров конструкции, что вызывает внутренние механические напряжения, нарушается геометрическая форма, и все это приводит к температурным разбалансировкам и изменению динамических характеристик ММГ [2, 3].

Для оценки изменения собственных частот осциллятора во всем рабочем температурном диапазоне проведено исследование динамики ММГ по оси первичных колебаний. Модель гироскопа, совершающего первичные колебания, представляется в виде микрорезонатора с амплитудой вибровозбуждения  $x = x_0 \sin \omega t$  [4]. Такая модель адекватно описывает и повторяет поведение микромеханического гироскопа в режиме движения. Модель определения влияния температуры на собственные частоты должна учитывать температурные зависимости температурного коэффициента расширения (ТКР) и температурную зависимость модуля упругости кремния. Такие зависимости представлены на рис. 1, 2.

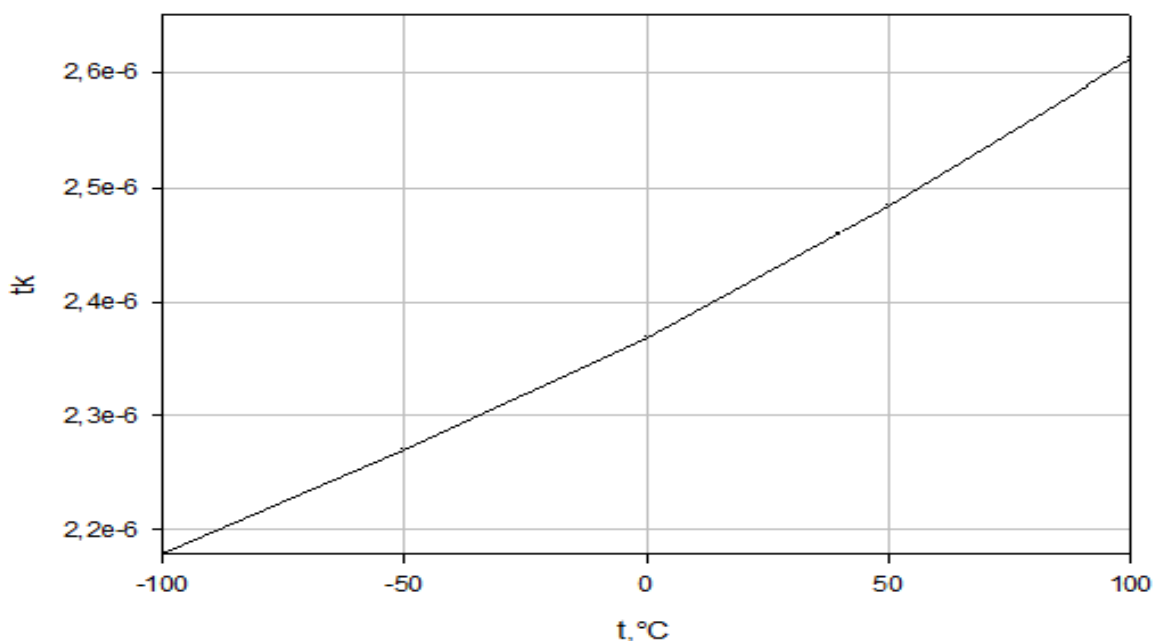
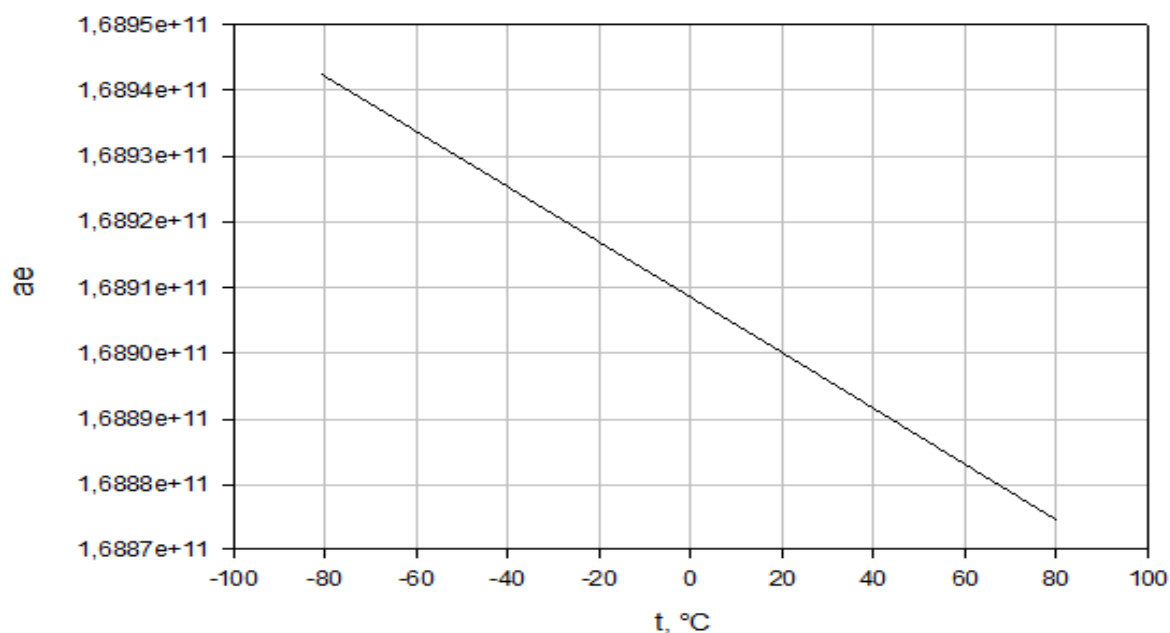


Рис. 1. Температурный коэффициент расширения кремния



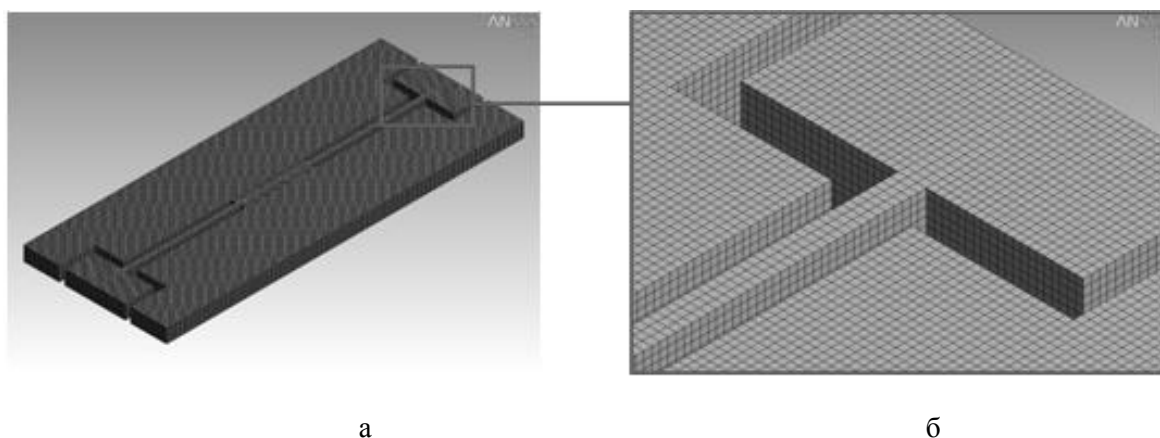
**Рис. 2.** Зависимость модуля упругости от температуры

Функция, отражающая зависимость модуля упругости кремния от температуры, имеет вид

$$E = E_0(1 + \alpha_E \Delta T),$$

где  $\alpha_E$  – температурный коэффициент модуля упругости материала;  $\Delta T$  – изменение температуры;  $E_0$  – значение модуля упругости материала при начальной температуре. Для кремния коэффициент  $\alpha_E = 2,5 \cdot 10^{-6}$ , что соответствует рис. 2.

В среде ANSYS проведен модальный анализ для определения собственных частот микрорезонатора, конечно-элементная модель которого приведена на рис. 3, а. На рис. 3, б представлен увеличенный фрагмент КЭ сетки.



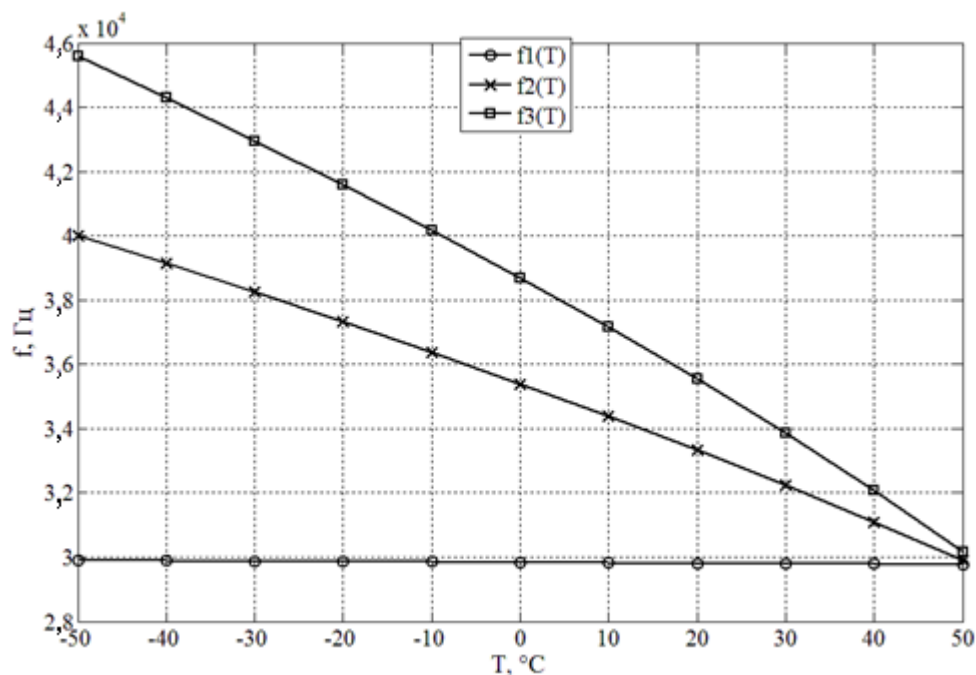
**Рис. 3.** Конечно-элементная модель микрорезонатора: а – резонатор; б – увеличенный фрагмент КЭ сетки

Конструкция микрорезонатора представляет собой инерционную массу, колеблющуюся на упругих перемычках, закрепленных в корпусе.

Материал микрорезонатора выбран монокристаллический кремний с кристаллографической ориентацией резонатора на пластине (111). Колебания микрорезонатора совершаются в направлении  $\langle 1-10 \rangle$ . Механические свойства кремниевой пластины с ориентацией (111) изотропны в плоскости колебаний микрорезонатора. Номинальная рабочая температура датчика,

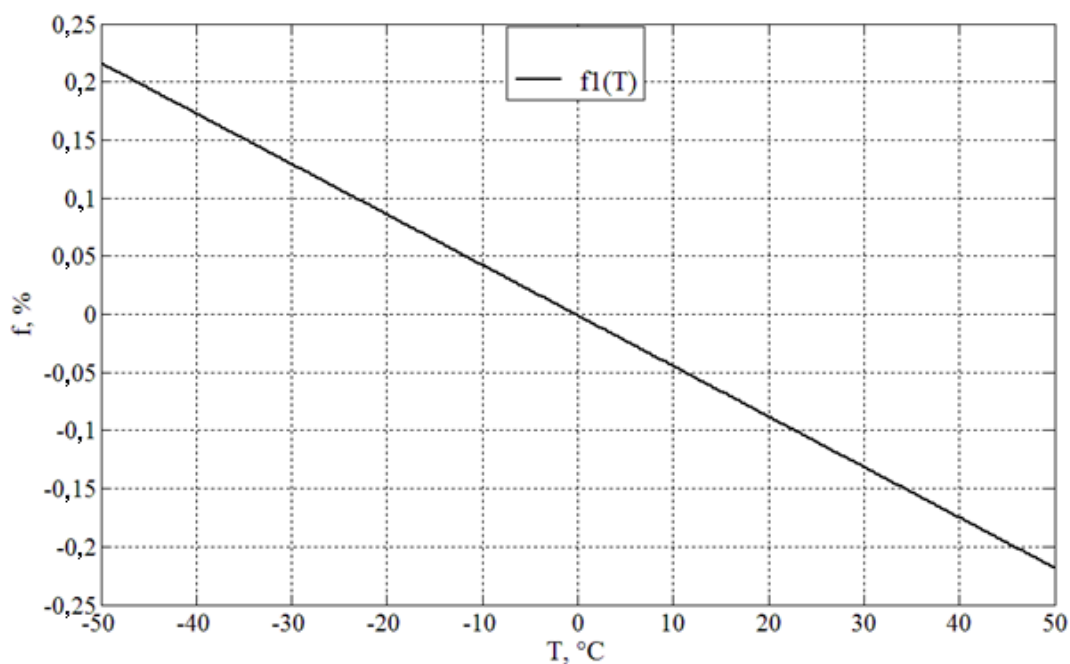
соответствующая номинальным размерам резонатора и номинальным его механическим свойствам, принята 20 °С. Диапазон рабочих температур выбран от –50 до +50 °С.

Значения частот для первых трех мод вследствие изменения термоупругого состояния кремния приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Частоты первых трех мод колебаний микрорезонатора

Наименее чувствительна к изменению температуры первая мода колебаний. Причем в области высоких температур частоты первых трех мод оказываются близки, что требует наиболее точной стабилизации рабочей частоты осциллятора. В данном случае первая мода является рабочей для гироскопа, так как она имеет наименьшее относительное изменение частоты.



**Рис. 5.** Относительное изменение собственной частоты осциллятора для первой моды

Абсолютное изменение первой собственной частоты составляет 131 Гц, что серьезно может повлиять на стабильность масштабного коэффициента, а следовательно, на точность измерения угловой скорости. Для уменьшения влияния изменений температуры на точность измерения угловой скорости необходимо использовать систему температурной стабилизации, представляющую собой комбинацию емкостных датчиков, способных создавать положительную либо отрицательную жесткость. Зависимость, отражающая дрейф собственных частот (рис. 5), имеет линейный вид, что в значительной мере упрощает алгоритм термостабилизации.

В результате исследования определена наиболее температурно-независимая мода колебаний микрогироскопа по оси первичных колебаний. По отношению ко всему диапазону частот изменение частот первой моды составляет 0,44 %. По полученной зависимости можно наглядно оценить влияние температуры на собственные частоты осциллятора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. Исследование режима функционирования микромеханического гироскопа с совмещенными частотами по осям первичных и вторичных колебаний / А.С. Ковалев, Д. Г. Грязин, Ю.В. Шадрин и др. // Научное приборостроение. – 2007. – Т. 17, № 1. – С. 91–97.
3. К вопросу построения контура обратной связи микромеханического гироскопа / Д.Г. Грязин, А.С. Ковалев, Д.И. Лычев, Ю.В. Шадрин // РАН. Научное приборостроение. – 2007. – Т. 17. – Вып. 1. – С. 91–97.
4. С.Е. Вторушин, Т.Г. Нестеренко. Двухкомпонентный микромеханический гироскоп компенсационного типа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 10. – С. 41–48.
5. Моделирование конструкционных и динамических характеристик двухкомпонентного микромеханического гироскопа / Е.С. Барбин, П.Ф. Баранов, А.Н. Коледа и др. // Вестник науки Сибири. – 2013. – № 1(7). – С. 96–105. – Режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/viewPDFInterstitial/612/464> (дата обращения 10. 11. 2013)

*Поступила 20. 11. 2013 г.*