

УДК 531.383

## ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

С.Е. Вторушин, 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.

**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 влияния температурного воздействия на механические характеристики микромеханического гироскопа, чувствительный элемент которого расположен на кремниевой пластине с кристаллографическими ориентациями (100), (110), (111). 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 микромеханического гироскопа. В результате получены температурные зависимости собственных частот гироскопа для пяти вариантов расположения

чувствительного элемента на кремниевой пластине, а также определена зависимость масштабного коэффициента от температуры для наиболее температурнезависимого варианта расположения чувствительного элемента на кремниевой пластине. На основе математической модели, учитывающей условие резонансной настройки по осям первичных и вторичных колебаний, получены формы выходных колебаний гироскопа.

### Ключевые слова:

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

В работе исследуется влияние анизотропии механических свойств монокристаллического кремния на собственные частоты одноосного микромеханического гироскопа (ММГ) LL-типа при воздействии стационарных тепловых полей. Принципиальная схема исследуемого гироскопа приведена на рис. 1.

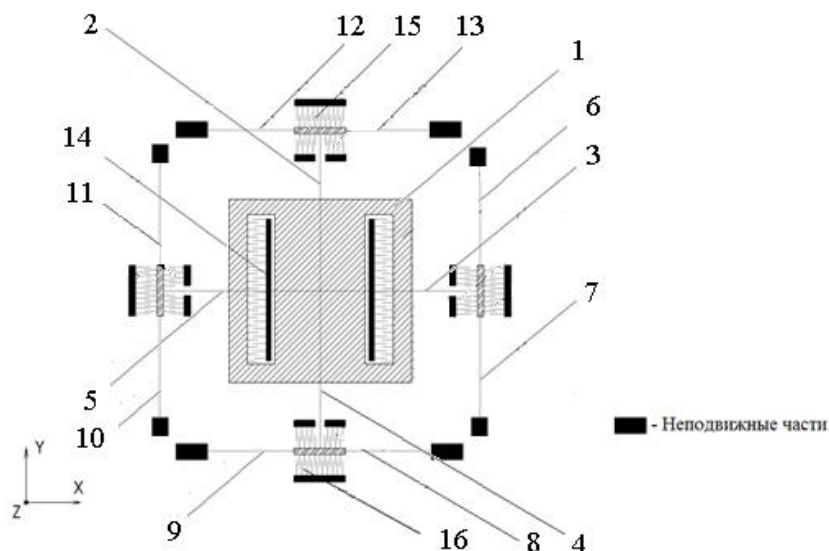


Рис. 1. Принципиальная схема ММГ

Гироскоп имеет одну ось чувствительности  $Z$  и содержит инерционную массу  $I$ , имеющую две степени свободы, обеспечиваемые упругими подвесами 2–13. Первичные поступательные колебания возбуждаются вдоль оси  $X$  при помощи вибропривода 14 с частотой, равной собственной частоте  $\omega_{0x}$  гироскопа по оси  $X$ . Информация об угловой скорости вокруг оси  $Z$  снимается с емкостных гребенчатых датчиков 15, 16.

Метрологические характеристики ММГ существенно зависят от материала осциллятора. Основным материалом структуры осциллятора является кремний, который обладает рядом специфических свойств, позволяющих использовать именно его. 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 последнего 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 конструкции напрямую зависят от жесткости упругого подвеса, вследствие чего стабильность этого параметра необходимо поддерживать с высокой точностью. Аналитически собственная частота связана с жесткостью выражением [1]

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

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, все это приводит к температурным разбалансировкам и изменению динамических характеристик ММГ [2].

Для оценки изменения собственных частот осциллятора в рабочем температурном диапазоне от  $-50$  до  $+80$  проведен температурно-модальный анализ ММГ. В качестве конструкционного материала был выбран монокристаллический кремний, имеющий анизотропию механических и температурных свойств. Исследование проводилось для пяти наиболее часто используемых вариантов расположения чувствительного элемента (ЧЭ) на кремниевой пластине в зависимости от плоскости и направлений ориентации пластины (табл. 1).

**Таблица 1.** Варианты расположения ЧЭ на пластине

Ориентация пластины	Вариант 1 (100)	Вариант 2 (100)	Вариант 3 (110)	Вариант 4 (110)	Вариант 5 (111)
Ориентация кристаллографических осей	$X \langle 100 \rangle$ $Y \langle 010 \rangle$ $Z \langle 001 \rangle$	$X \langle 110 \rangle$ $Y \langle -110 \rangle$ $Z \langle 001 \rangle$	$X \langle 100 \rangle$ $Y \langle 011 \rangle$ $Z \langle 0-11 \rangle$	$X \langle 111 \rangle$ $Y \langle -211 \rangle$ $Z \langle 0-11 \rangle$	$X \langle -1-12 \rangle$ $Y \langle 1-10 \rangle$ $Z \langle 111 \rangle$

Механические и температурные характеристики кремния, такие как модуль Юнга, модуль сдвига и температурный коэффициент модуля Юнга, для каждого варианта расположения задавались в явном виде. В силу кубической симметрии монокристаллического кремния его анизотропные механические свойства могут быть описаны тензорами второго ранга с тремя независимыми коэффициентами жесткости либо коэффициентами податливости кристалла. Соответствующие механические и температурные характеристики кристалла для каждого из вариантов могут быть найдены путем преобразования компонент тензора исходной системы координат в компоненты тензора целевой системы координат, используя выражение [3]:

$$T'_{ij} = a_{ik} a_{jl} T_k,$$

где  $T'_{ij}$  – тензор компонент целевой системы координат;  $a_{ik}, a_{jl}$  – матрицы направляющих косинусов;  $T_k$  – тензор компонент исходной системы координат.

Исследования проводились с использованием системы ANSYS для двухосного ММГ LL-типа, конечно-элементная модель (КЭ) которого приведена на рис. 2.

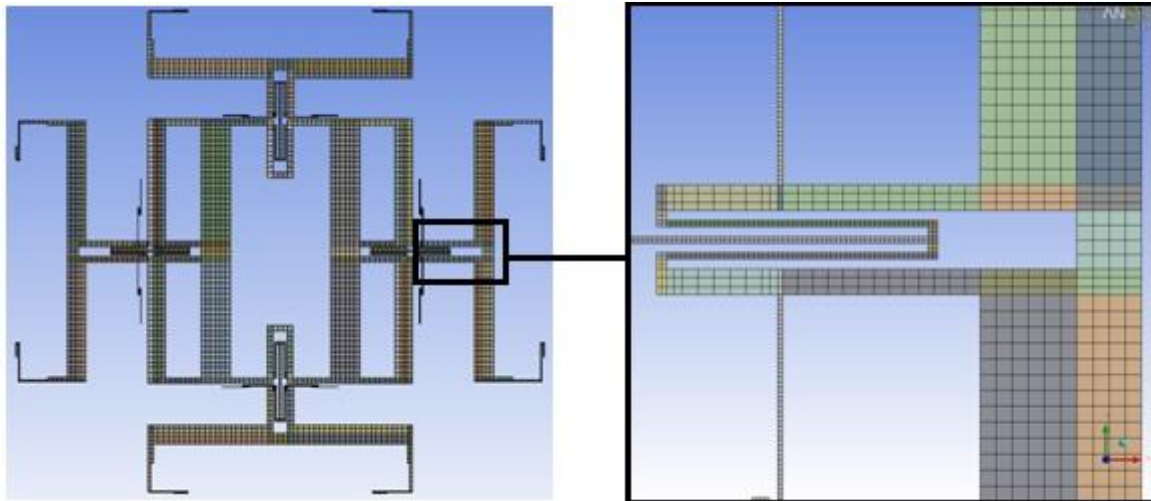


Рис. 2. КЭ-модель ММГ

Номинальная рабочая температура датчика, соответствующая номинальным размерам резонатора и номинальным его механическим свойствам, принята 20 °С. Диапазон рабочих температур выбран от -50 до +80 °С.

Зависимости, отражающие изменение собственных частот вследствие изменения термоупругого состояния конструкции, приведены на рис. 3–5.

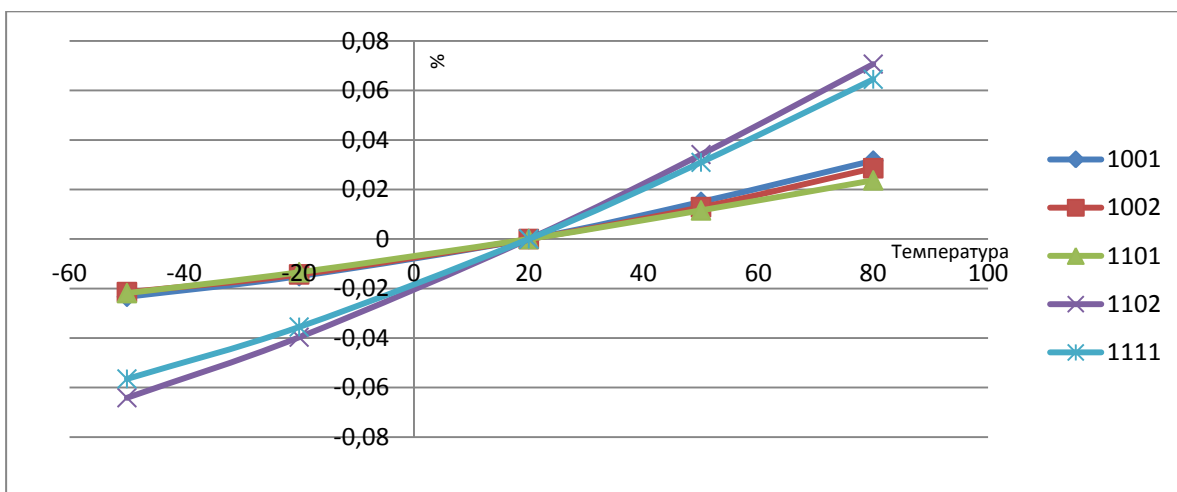


Рис. 3. Частоты первой моды колебаний ММГ

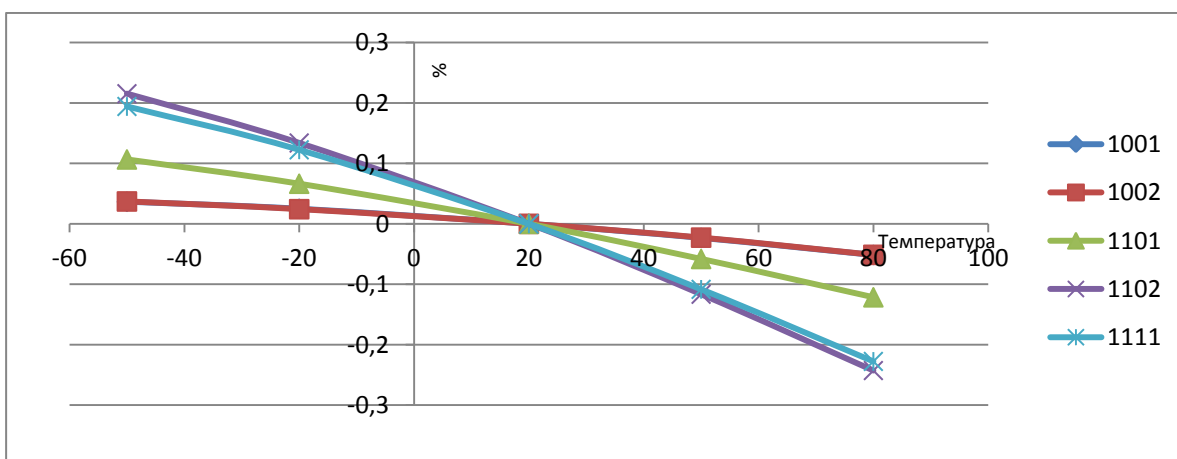


Рис. 4. Частоты второй моды колебаний ММГ

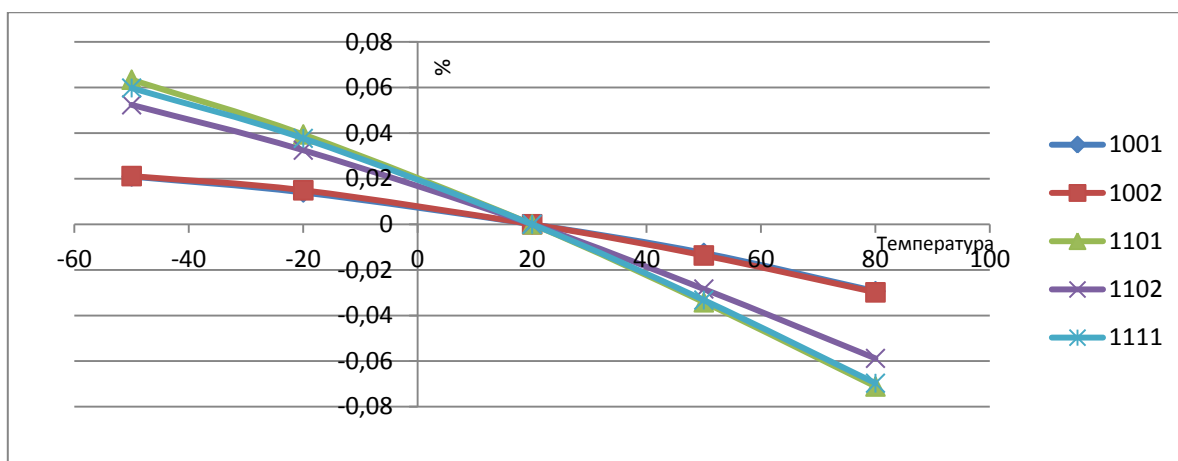


Рис. 5. Частоты второй моды колебаний ММГ

Абсолютное и относительное изменение собственных частот для пяти вариантов расположения ЧЭ на пластине приведены в табл. 2 и на рис. 6 соответственно.

Таблица. 2 Абсолютные изменения собственных частот

Мода	Вариант 1 (100), Гц	Вариант 2 (100), Гц	Вариант 3 (110), Гц	Вариант 4 (110), Гц	Вариант 5 (111), Гц
1	0,054971	0,050045	0,045535	0,134770	0,121008
2	0,087983	0,088351	0,228075	0,458048	0,421891
3	0,050324	0,050983	0,134549	0,111180	0,129450

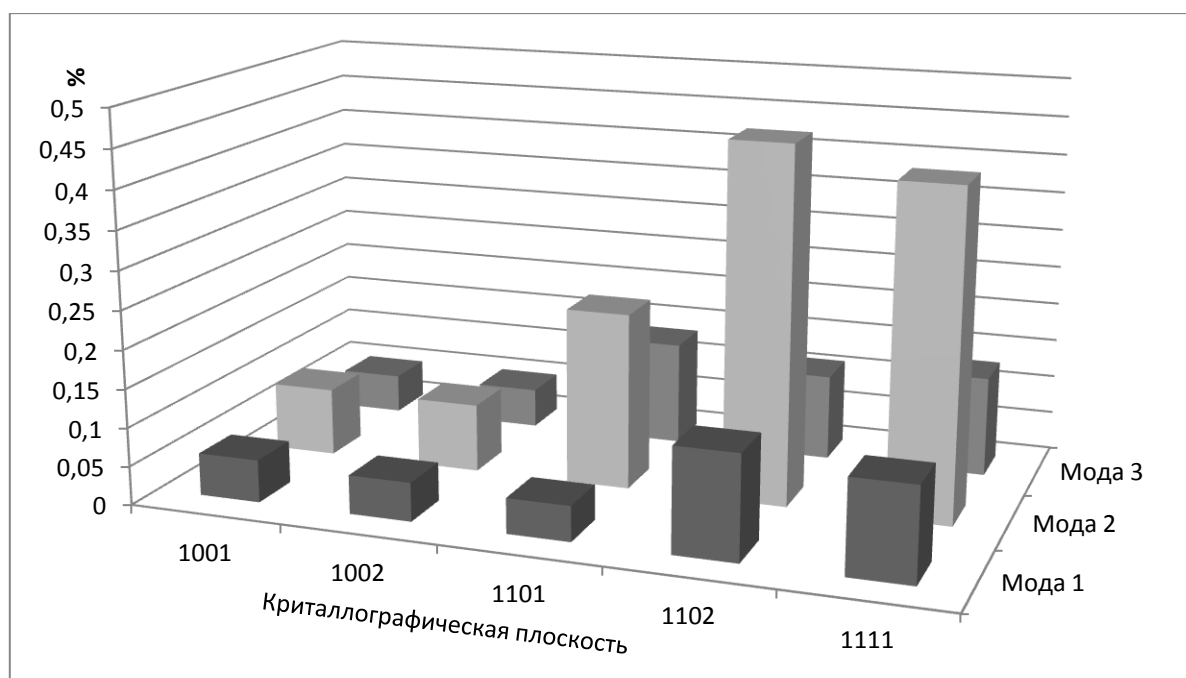


Рис. 6. Относительное изменение собственных частот ММГ

Наименее чувствительна к изменению температуры пластина с кристаллографической ориентацией (100) (рис. 6).

Для получения зависимости масштабного коэффициента от температуры была составлена математическая модель ММГ, состоящая из двух нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, которая отражает динамические характеристики ММГ. Математическая

модель содержит в себе зависимости собственных частот, коэффициентов жесткости и модальных масс от температуры, аппроксимированные полиномами второго порядка.

Полученная зависимость масштабного коэффициента от температуры приведена на рис. 7.

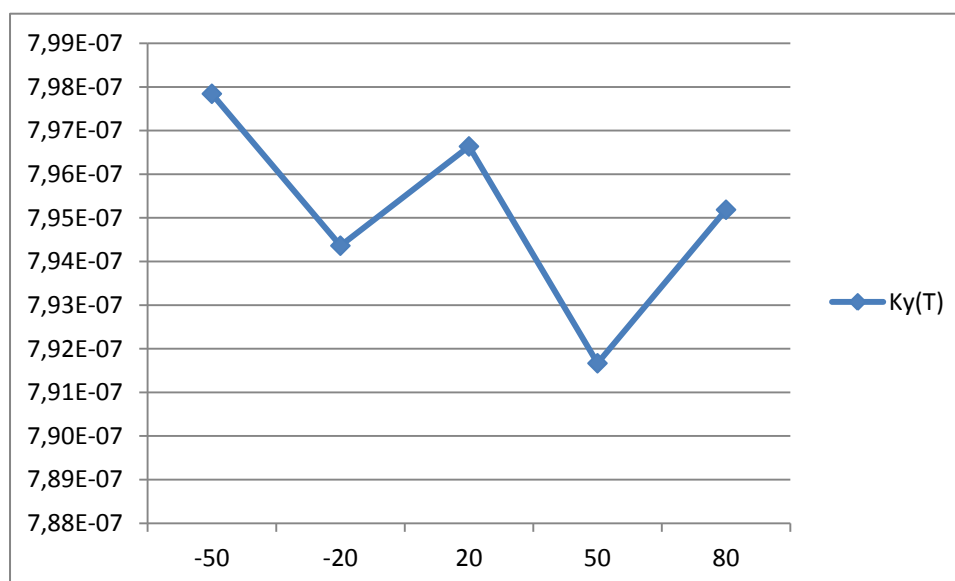


Рис. 7. Температурная зависимость масштабного коэффициента

Для уменьшения влияний изменений температуры на точность измерения угловой скорости необходимо использовать систему температурной стабилизации, представляющую собой комбинацию емкостных датчиков, способных создавать положительную либо отрицательную жесткость [1]. Зависимости, отражающие дрейф собственных частот, имеют практически линейный вид, что в значительной мере упрощает алгоритм термостабилизации.

В результате исследования определен наиболее подходящий вариант расположения ЧЭ на кремниевой пластине, при котором наблюдаются наименьшие отклонения собственных частот в рабочем диапазоне температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.: ил.
2. Вторушин С.Е., Нестеренко Т.Г. Двухкомпонентный микромеханический гироскоп компенсационного типа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2013. – № 10. – С. 41–48.
3. J.F. Nye, M.A., Ph. D. Physical properties of crystals their representation by tensors and matrices. Lecturer in Physics in the University of Bristol. – Oxford at the Clarendon press, 1964.

Поступила 23.05.2014 г.