

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КРЕМНИЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА СВОЙСТВА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Исследуется влияние ориентации кремниевой структуры (100), (110), (111) на основные характеристики микромеханических акселерометров при воздействии рабочих температур. В среде ANSYS разработаны модели микромеханических акселерометров осевого и маятникового типов и определены зависимости собственных частот и масштабных коэффициентов от температуры окружающей среды при различных ориентациях кремниевой структуры.

Введение и постановка задачи

Микромеханические акселерометры изготавливаются по технологии микро-электромеханических систем путем формирования требуемой конструкции в кремниевом структурном слое групповыми методами микроэлектроники. Так как монокристаллический кремний является анизотропным, т.е. имеет различные свойства в различных направлениях, то и микромеханические (МКМ) акселерометры различного типа (осевого типа или маятникового типа) будут по-разному себя вести в одной и той же ориентации [1]. На рис. 1 и 2 приведены конструктивные схемы МКМ акселерометров осевого и маятникового типов [3].

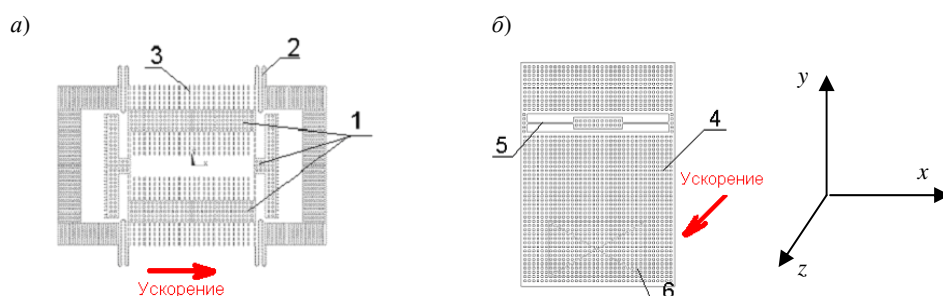


Рис. 1. Конструктивная схема чувствительного элемента осевого (а) и маятникового (б) ММА

Измерительная ось осевого акселерометра (рис. 1, а) расположена в плоскости чувствительного элемента (ЧЭ) и направлена вдоль оси X. ЧЭ этого типа представляет собой инерционную массу 1 ($m = 0.2 \cdot 10^{-6}$ кг), изготовленную из монокристаллического кремния и подвешенную на четырех упругих торсионах 2. Инерционная масса отклоняется под действием ускорения вдоль измерительной оси, перемещения регистрируются при помощи емкостного гребенчатого датчика перемещений 3. Размер ЧЭ составляет $1 \times 0,8$ мм. Чувствительным элементом маятникового акселерометра является маятник с инерционной мас-

Федоров Максим Вячеславович. Инженер ОАО «Гирооптика» (С.-Петербург). Аспирант Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения.

сой 4 ($m = 0.6 \cdot 10^{-6}$ кг) монокристаллического кремния, подвешенной на упругих торсионах 5. Ось торсионов смещается от оси симметрии пластины ($l = 447 \mu m$), создавая маятниковость. Измерительная ось маятникового акселерометра расположена перпендикулярно плоскости ЧЭ и направлена вдоль оси Z. Инерционная масса отклоняется под действием ускорения вдоль измерительной оси, перемещения регистрируются при помощи емкостного датчика перемещений 6. Размер ЧЭ составляет 1,5x0,8 мм.

Цель работы состоит в том, чтобы определить наиболее рациональную ориентацию кремниевой структуры (100), (110), (111), для различных типов микромеханических акселерометров при воздействии температур в диапазоне от -60 до +60°C. При проведении расчетов учитывалось, что направление оси X совпадает с направлением кристаллографической решетки.

Исходные данные

Расчетная схема определения влияния температуры на характеристики акселерометра должна учитывать температурные зависимости коэффициента температурного расширения (КТР) кремния, а также температурную зависимость модуля Юнга. Учитывая температурные зависимости, можно сформировать матрицу жесткости, которая отражает свойства анизотропного материала. Для монокристаллического кремния матрица жесткости имеет вид:

$$\begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы жесткости C_{ij} определяются через элементы матрицы податливости S_{ij} следующими выражениями [2]:

$$S_{11} = \frac{1}{E}; \quad S_{12} = \frac{-\mu}{E}; \quad S_{44} = (S_{11} - S_{12} - A)^2,$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; A – коэффициент анизотропии ($A = 0.354 \cdot 10^{-11}$ м²/Н);

$$C_{11} = \frac{S_{11} + S_{12}}{(S_{11} + 2S_{12})(S_{11} - S_{12})}; \quad C_{12} = \frac{-S_{12}}{(S_{11} + 2S_{12})(S_{11} - S_{12})}; \quad C_{44} = \frac{1}{S_{44}}.$$

Матрица жесткости для температуры 20°C, ориентации (100) и направления [010] имеет вид:

$$C := \begin{pmatrix} 1.6561 \times 10^5 & 79443 & 79443 & 0 & 0 & 0 \\ 79443 & 1.6561 \times 10^5 & 79443 & 0 & 0 & 0 \\ 79443 & 79443 & 1.6561 \times 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 63924 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 63924 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 63924 \end{pmatrix}$$

Полученные матрицы жесткости используются в качестве свойств материалов при расчетах в комплексе ANSYS.

Результаты моделирования

Используя модели, построенные на основе конструктивных схем (см. рис. 1), можно определить собственные частоты акселерометров в зависимости от ориентации кремниевой структуры и температуры. Моды колебаний первых собственных частот микромеханических акселерометров маятникового (колебания структуры относительно оси x) и осевого типов (колебания вдоль оси x) приведены на рис. 2. В таблице представлены значения первых двух собственных частот МКМ акселерометров маятникового и осевого типов в зависимости от ориентации и направления кремниевой структуры.

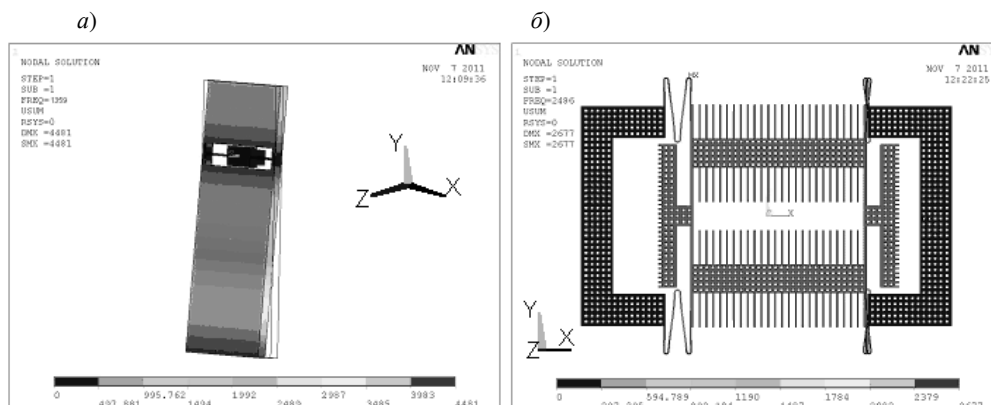


Рис. 2. Мода первой собственной частоты колебания маятникового акселерометра (а) и осевого акселерометра (б)

Значения собственных частот микромеханических акселерометров в зависимости от ориентации кремния

Тип акселерометра	Номер собственной частоты	Ориентация (100), Гц Направление [010], Гц	Ориентация (100), Гц Направление [011], Гц	Ориентация (110), Гц Направление [110], Гц	Ориентация (110), Гц Направление [001], Гц	Ориентация (111), Гц
Осевой	1	2486	2736	2513	2753	2738
	2	6112	6317	5782	5954	5855
Маятниковый	1	1359	1338	1360	1115	1154
	2	3030	3428	3035	3410	3525

Аналогичным образом были рассчитаны зависимости собственных частот МКМ акселерометров от температуры окружающей среды. Из полученных значений собственных частот, используя уравнения движения, были определены перемещения X и масштабные коэффициенты, считая, что величина измеряемого ускорения постоянна:

для маятникового акселерометра

$$X = \alpha \cdot R,$$

где α – угол поворота инерционной массы ($\alpha = \frac{m \cdot a \cdot l}{C}$); R – расстояние до края инерционной массы от места крепления торсионов ($R = 976 \text{ }\mu\text{m}$); m – масса подвижной части; a – линейное ускорение; l – расстояние от оси подвеса до центра масс; C – жесткость подвесов ($C = f^2 \cdot I_{xx}$); f – первая собственная частота; I_{xx} – момент инерции пластины относительно оси подвеса;

для осевого акселерометра

$$X = \frac{m \cdot a}{C},$$

где m – масса подвижной части; a – ускорение; C – жесткость подвеса ($C = f^2 \cdot m$); f – первая собственная частота.

На рис. 3 показаны графики зависимости масштабного коэффициента осевого акселерометра от температуры окружающей среды при различной ориентации (100), (110) и (111) кремниевой структуры и различных направлениях [010], [011].

Пунктиром показано значение масштабного коэффициента до алгоритмической компенсации, сплошной линией после алгоритмической компенсации. Алгоритмическая компенсация использовалась для снижения температурной погрешности масштабного коэффициента от температуры. Для этого зависимость масштабного коэффициента аппроксимировалась полиномом второго порядка, а затем из значения масштабного коэффициента вычиталось значение полинома. Такая компенсация позволяет снизить температурную погрешность масштабного коэффициента на порядок

$$MK_i = MKf_i - [a \cdot (T_i - 20) + b(T_i - 20)^2],$$

где MK_i – значение масштабного коэффициента после алгоритмической компенсации; MKf_i – значение масштабного коэффициента до алгоритмической компенсации; a и b – коэффициенты полинома, найденные аналитически; T_i – температура в градусах Цельсия.

Из рисунка видно, что для осевого акселерометра минимальное изменение масштабного коэффициента составляет 0.017% и достигается при ориентации кремния (100) и направлении базового среза [011].

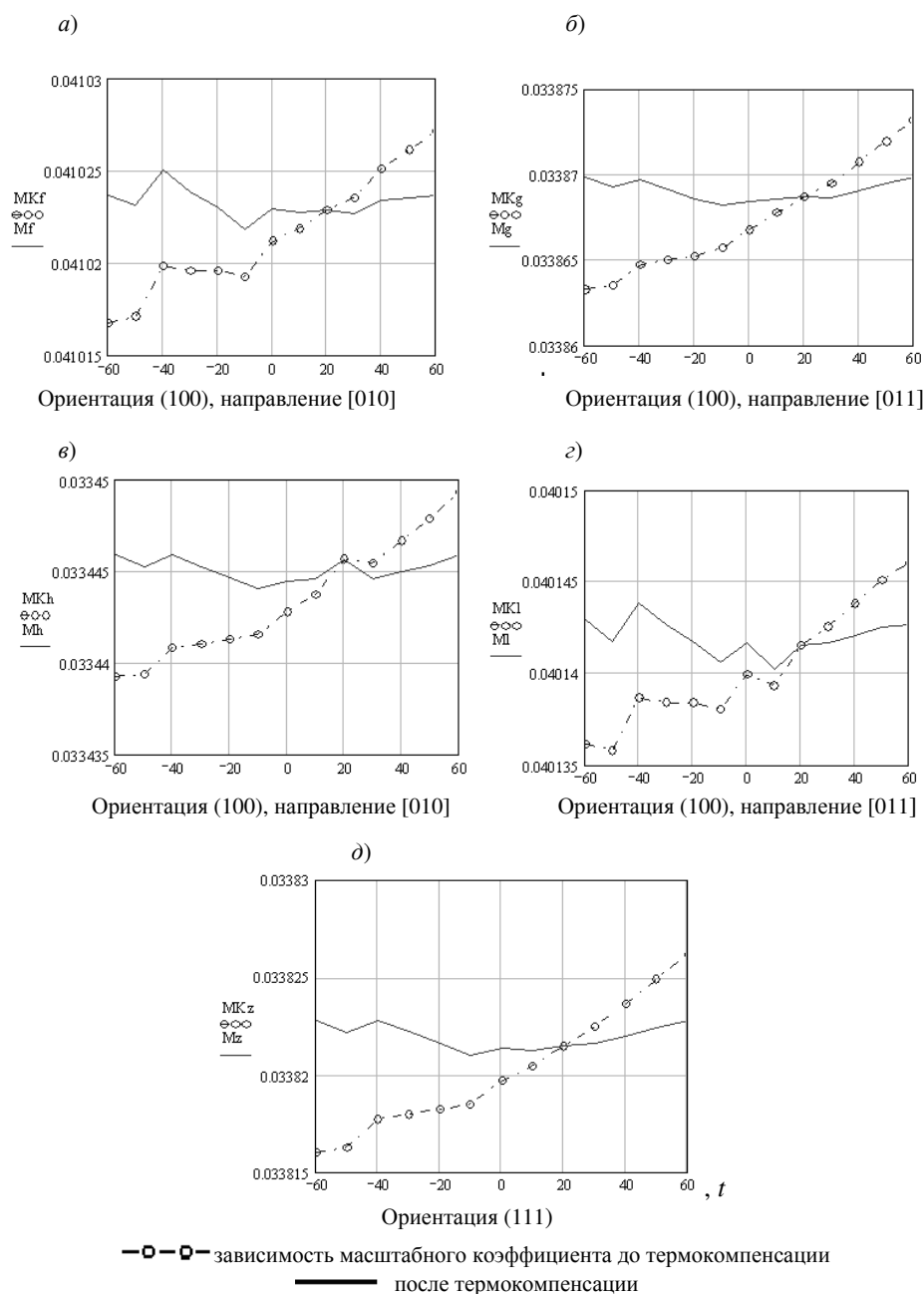


Рис. 3. Графики зависимости масштабного коэффициента осевого акселерометра от температуры окружающей среды

На рис. 4 показаны графики зависимости масштабного коэффициента маятникового акселерометра от температуры окружающей среды при различной ориентации (100), (110) и (111) кремниевой структуры и различных направлениях [010], [011].

Пунктиром показано значение масштабного коэффициента до алгоритмической компенсации, а сплошной линией после алгоритмической компенсации.

Для снижения температурной погрешности масштабного коэффициента от температуры окружающей среды, так же как и для осевого акселерометра, использовалась алгоритмическая компенсация.

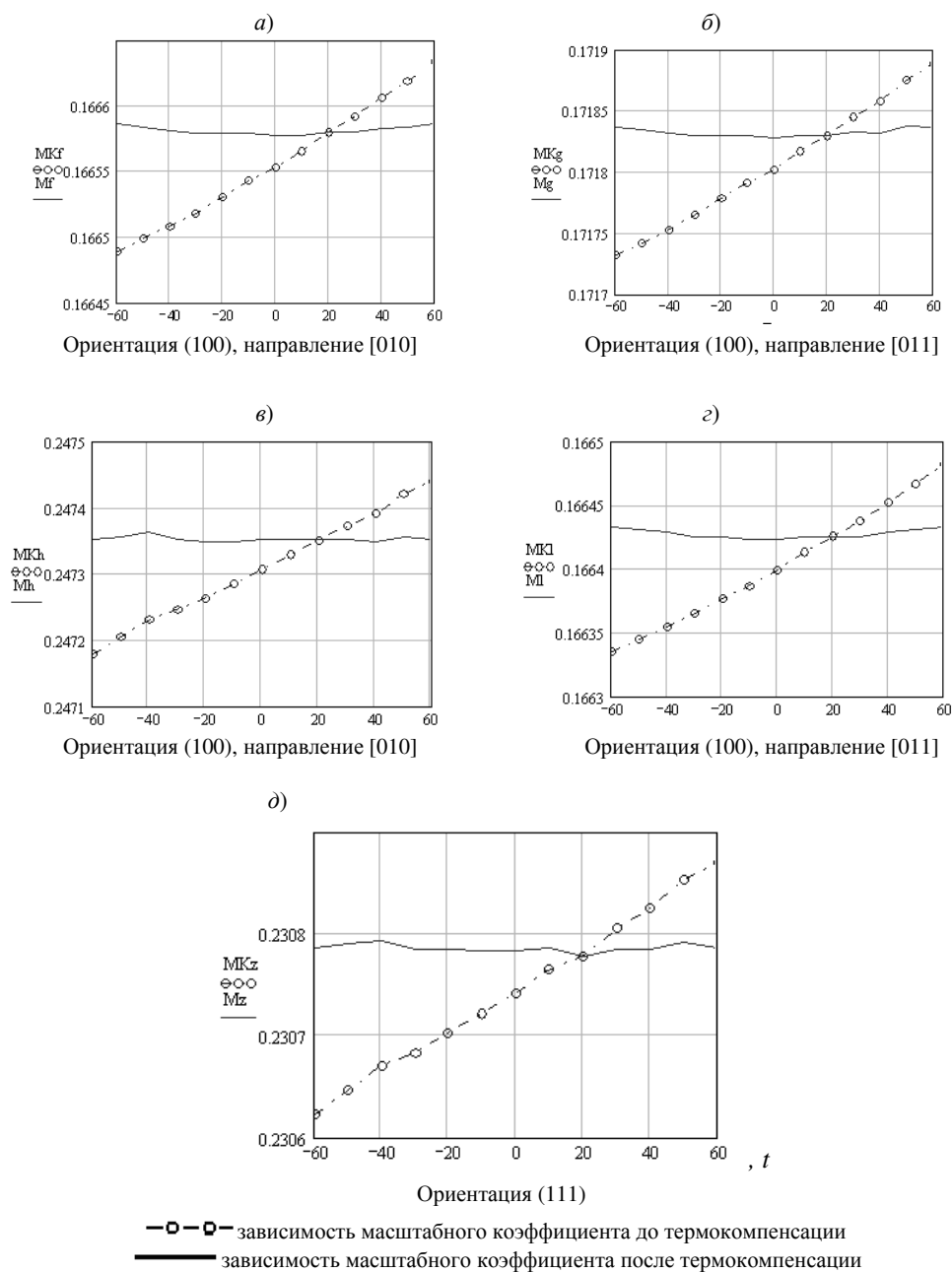


Рис. 4. Графики зависимости масштабного коэффициента осевого акселерометра от температуры окружающей среды

Из рисунков видно, что для маятникового акселерометра наименьшее изменение масштабного коэффициента, равное 0.05%, наблюдается при ориентации кремния (110) и направлении базового среза [010].

Выводы

Проведенные расчеты позволили определить наиболее предпочтительные направления базового среза и ориентации кремния при проектировании микро-механических акселерометров осевого и маятникового типов по критерию минимального влияния температуры окружающей среды на значение масштабного коэффициента.

Показано, что для акселерометра маятникового типа целесообразно использовать кремний с ориентацией (110) и направлением базового среза [010], а для акселерометра осевого типа – кремний с ориентацией (100) и направлением базового среза [011].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы // М.: Машиностроение, 2007.- С. 83-91.
2. **Ваганов, В.И.** Интегральные тензопреобразователи // Энергоатомиздат, 1983.- С. 15 -21.
3. **Попова, И. В.** Микромеханические датчики и системы, практические результаты и перспективы развития / И. В. Попова [и др.] // XII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам.- СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2005.- С. 262 – 267.

Abstract. The given work is directed on defining what orientation of silicon structure (100), (110), (111), is most preferable to various types micromechanical accelerometers. As monocrystal silicon is anisotropic, i.e. has various properties in various directions also micromechanical accelerometers various type there will be differently to behave in the same orientation. As a result of the given work models micromechanical accelerometers translation and pendular types are created and by means of computer complex ANSYS are defined: dependence of self-frequencies, dependence of the output characteristic and dependence of scale factor on temperature at various orientations of silicon structure. The basic results of work are conclusions about what orientation of silicon is the most preferable to each of types micromechanical accelerometers. The problem of choosing orientation is very important, and so discussion this problem expect special attention from us. Today in Russia few works discuss this problem, but problem solving, will be able to solve many another problems.

Key words: silicon, micromechanical accelerometer, properties, orientation, dynamic behavior

Материал поступил 12.11.10