

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ МИКРОСИСТЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Развитие сенсорной техники постоянно движется по пути микроминиатюризации первичных преобразователей информации. В последние годы появилось новое направление в микроэлектронике МЕМС (микроэлектромеханические сенсоры). Особенно мощный прорыв в данном направлении произошел, когда в качестве материала для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) сенсоров стал использоваться кремний. Оказалось, что этот материал обладает прекрасными механическими свойствами при размерах элементов миллиметрового – микронного диапазонов [1].

Благодаря возможности анизотропного травления кремния по разным кристаллографическим плоскостям, можно формировать из него объемные ЧЭ различной формы и сложности (см. табл.).

Следует отметить, что скорости травления зависят не только от типа травителя (как это видно из таблицы), но и от условий травления: температуры процесса, концентрации травителя, интенсивности перемешивания и т.п. [1, 2].

Далее в настоящей работе приведены расчет и конструкция полупроводникового емкостного акселерометра балочного типа.

В большинстве конструкций емкостных акселерометров подвижный ЧЭ образует с неподвижными обкладками дифференциальный конденсатор. При нулевом смещении ЧЭ акселерометра находится в центральном (несмещенном) положении. При этом емкость конденсатора $C=C_0$. Пренебрегая краевыми эффектами емкость плоскопараллельного конденсатора можно найти из выражения:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon S / d, \quad (1)$$

где ϵ_0 , ϵ - соответственно, диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость среды между электродами; S - площадь электродов; d - расстояние между ЧЭ и неподвижными электродами.

В случае приложения некоторого ускорения вдоль оси, перпендикулярной плоскости акселерометра, на ЧЭ действует изгибающая сила:

$$P = ma, \quad (2)$$

где a - величина ускорения; m - масса инерционного элемента (массой торсиона можно пренебречь из-за ее малости).

Таблица 1. Скорости травления кремния по различным кристаллографическим направлениям для пластин с ориентацией поверхности (100) и (110)

Травитель	V, мкм/ч для плоскости (100)				V, мкм/ч для плоскости (110)				
	[100]	[110]	[210]	[310]	[100]	[110]	[111]	[221]	[331]
100 г КОН на 100 мл H ₂ O	129	<16	177	119	11	166	2	105	127
Гидразин- гидрат	27	10	40	37	2	45	2	64	70

Под действием этой силы торсион отклоняется от нулевого положения на некоторый угол ϕ . Величина угла отклонения определяется жесткостью упругого элемента (УЭ), которая уравнивает действие изгибающей силы P . В свою очередь жесткость

торсиона определяется его геометрическими размерами, а также модулем Юнга и коэффициентом Пуассона используемого материала.

Для расчета упругих характеристик тонких пластин, к которым можно отнести рассматриваемый УЭ, необходимо принятие следующих гипотез [3]:

1. Линейный элемент при изгибе остается прямым и перпендикулярным к изогнутой срединной поверхности пластины.
2. Длина линейного элемента при изгибе не изменяется.
3. Взаимное давление между продольными слоями пластины отсутствует.
4. Перемещения точек срединной плоскости в направлении осей O_x , O_y (продольные перемещения) полагаются малыми величинами в сравнении с прогибом и в силу этого не учитываются.

Учитывая эти гипотезы, а так же используя допущение, что при $b \geq 2L$ изогнутую срединную поверхность большей части пластины можно считать цилиндрической, можно записать выражение для цилиндрической жесткости УЭ:

$$G = Ebh^3 / (12(1 - \nu^2)) \quad , \quad (3)$$

где ν - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости Юнга; b , h , L - ширина, толщина и длина УЭ, соответственно.

При этом максимальное напряжение в торсионе будет [4]:

$$\sigma = 6PL / bh^2. \quad (4)$$

Итак, результатом уравнивания изгибающей силы P и жесткости σ УЭ станет смещение его конца на величину [3]:

$$V = PL^3 / 3EI, \quad (5)$$

где $I = bh^3 / 12$ - момент инерции.

При этом угол смещения будет:

$$\varphi = PL^2 / 2EI. \quad (6)$$

Используя последнее выражение можно найти величину смещения свободного торца сейсмической массы:

$$F = V + L1 \sin \varphi, \quad (7)$$

где $L1$ - длина сейсмической массы.

Так как значения угла φ незначительны даже при максимальном смещении, то можно принять, что $\sin \varphi = \varphi$.

Тогда, подставляя значения φ и V в (7) и проводя несложные преобразования, в итоге получим выражение для расчета F :

$$F = PL^2 (2L + 3L1) / 6EI. \quad (8)$$

Смещение ЧЭ акселерометра приводит к изменению емкости конденсатора в зависимости от направления действия ускорения. Это изменение емкости конденсатора можно выразить как

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon S / (d \pm F). \quad (9)$$

Для малых отклонений ($F/d \ll 1$) справедливо равенство

$$\frac{1}{d \pm F} \approx \frac{1}{d} \left(1 \mp \frac{F}{d} \right). \quad (10)$$

В итоге изменение емкости линейного балочного акселерометра

$$C_1 = \int_0^{L1} dC = \frac{\epsilon_0 \epsilon t}{d} \int_0^{L1} \left(1 \mp \frac{F}{d} \right) L1 dL1 \quad (11)$$

где t - ширина сейсмической массы.

Собственная частота колебаний УЭ прямоугольного сечения выражается зависимостью:

$$f_0 = (0.162 h \sqrt{\frac{E}{\rho}}) / L^2. \quad (12)$$

где ρ - плотность материала УЭ.

Акселерометр является аналоговым датчиком и, разумеется, в системах с такими датчиками, оперирующими дискретными сигналами, возникает необходимость частотного согласования датчика с другими элементами систем [5], т.е. необходимо иметь представление о такой характеристике устройства, как быстродействие. Быстродействие акселерометра может быть оценено выражением:

где β - степень успокоения датчика; γ - его динамическая погрешность.

$$N = -2\pi f_0 \beta / \ln(\gamma \sqrt{1 - \beta^2}), \quad (13)$$

На рис. 1 $n = N/2\pi f_0$ [5]. Коэффициент β принимает значения от 0 до 1. Однако, выражение (13) может быть использовано для значений $\beta < 0,7$. При $\beta > 0,7$ реальное быстродействие примерно на половину больше расчетного (см. рис. 1).

Кроме быстродействия существует такая метрологическая характеристика датчиков механических величин, как информативность [6]:

$$A = S f_0^2, \quad (14)$$

где S - чувствительность датчика.

В свою очередь чувствительность УЭ постоянного сечения может быть записана:

$$S = B_6 L / h S_{cm} E, \quad (15)$$

где L , h , S_{cm} - соответственно, длина, толщина и сечение УЭ; B_6 - конструктивный коэффициент чувствительности.

B_6 меняется линейно от 6 в месте заделки до 0 в точке приложения силы. При расчетах обычно используется обобщенный конструктивный коэффициент $B_{6cp} = 3$.

При расчете характеристик полупроводниковых преобразователей механических величин необходимо учитывать, вдоль какой кристаллографической плоскости вырезана исходная пластина [7].

Для измерения линейных ускорений обычно используются акселерометры балочного типа (см. рис. 2а). На рисунке указаны кристаллографические направления в пластине кремния (100), вдоль которых производится ориентация фотошаблонов. На рис. 2б приведены характеристики акселерометра данной конструкции: зависимость величины смещения сейсмической массы и изменение одной из емкостей дифференциального конденсатора от ускорения.

Литература. 1. Петерсон К.Э. Кремний как механический материал// ТИИЭР.1982, т.70, №5. 2. В. М. Колешко, А. А. Ковалевский Поликристаллические пленки полупроводников в микроэлектронике. -Минск: Наука и техника, 1978. - 344 с. 3. Варданян Г.С. и др. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности.-М, 1995. 4. Концевой Ю.А. и др. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур.-М, 1982. 5. Тихонов А.И. Быстродействие датчиков механических величин// Приборы и системы управления. 1995, №1. 6. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под.ред. Е.П. Осадчего. -М, 1979. 7. Kolshko V.M., Kiryushin I.V. Deformation mechanism maps and gettering diagrams for single-crystal silicon. Phis. Stat. Sol., v. 109, № 161, 1988.

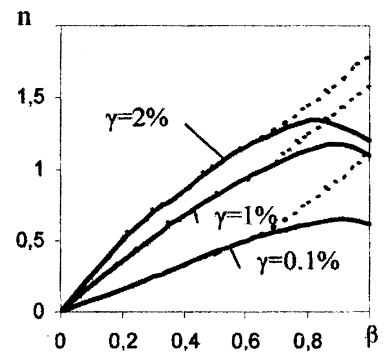


Рис. 1

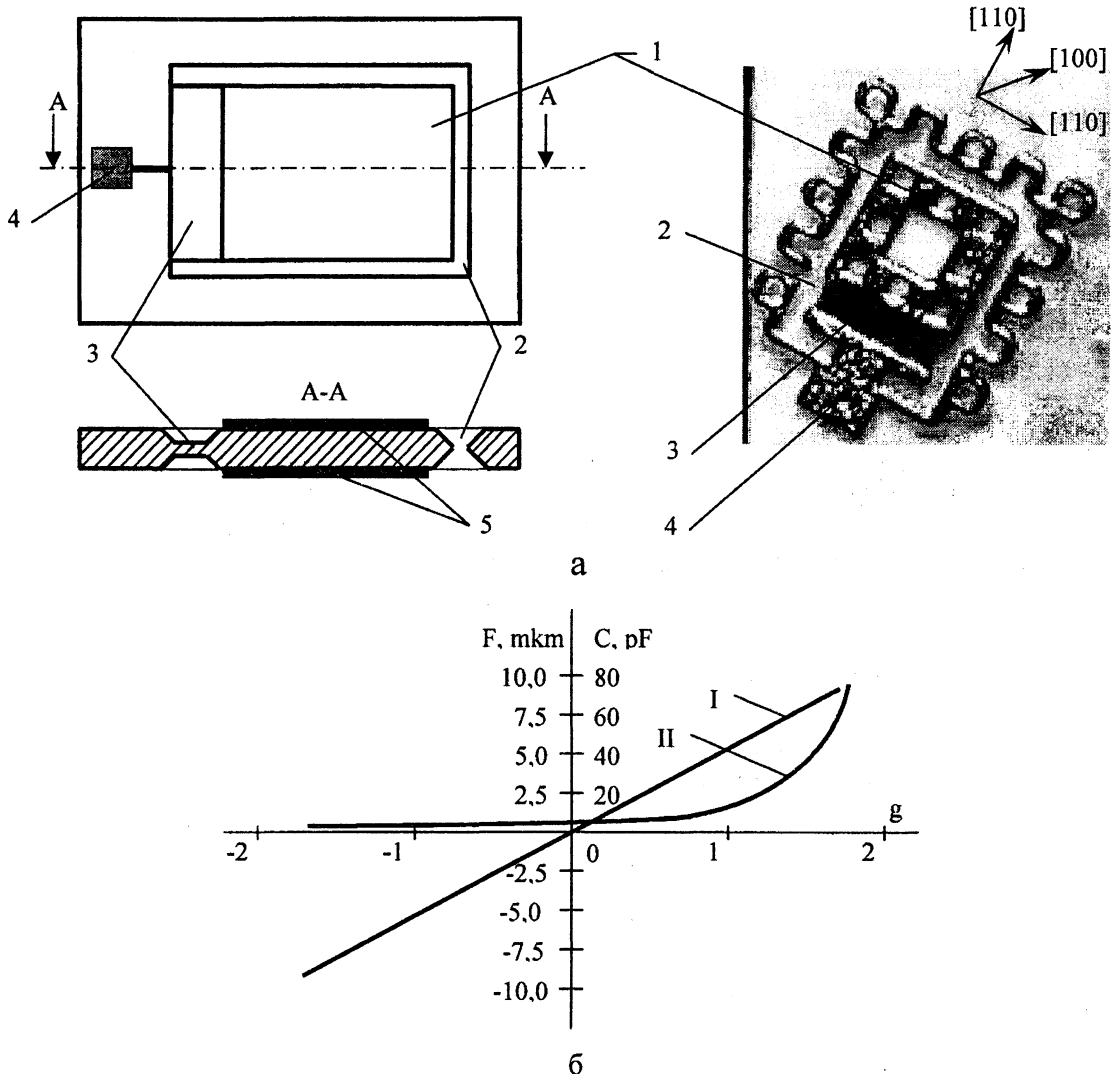


Рис. 2. Линейный емкостной акселерометр

- а) 1- сейсмическая масса; 2- разделительное щелевое отверстие; 3- балочный упругий элемент; 4- контактная площадка; 5- обкладки конденсаторов
 б) I – величина смещения сейсмической массы; II – изменение емкости

УДК 658.012.011.56

Ю.Н. Петренко, А.В. Симонович

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Большое количество механизмов промышленных предприятий и транспорта требуют регулирования скорости в широких пределах в статических режимах и высоких динамических свойств в переходных режимах.