

621.382.8(075)
С 232

№ 4060

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Технологический институт
Федерального государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Южный федеральный университет»

ПРИОРИТЕТНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ
“ОБРАЗОВАНИЕ”

Учебно-методическое пособие

**СБОРНИК ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ
ПО КУРСУ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**

Для студентов специальностей 210108 Микросистемная техника,
210202 Проектирование и технология электронно-вычислительных
средств, 210601 Нанотехнология в электронике
и направлений 210100 Электроника и микроэлектроника,
210200 Проектирование и технология электронных средств,
210600 Нанотехнологии

КАФЕДРА КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Таганрог 2007

УДК 621.382.8(075.8)

Составители: И.Е. Лысенко, Е.В. Полищук, В.А. Хайрулина

Учебно-методическое пособие «Сборник практических работ по курсу «Микроэлектромеханика».— Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007.— 27 с.

В данной работе приведены задания для практических работ по курсу «Микроэлектромеханика». Целью их выполнения является приобретение студентами практических навыков по расчету микромеханических элементов микросистемной техники с электростатической и тепловой активацией.

Ил. 16. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент Д.И. Чередниченко, канд. техн. наук, доцент кафедры ТМ и НА ТТИ ЮФУ.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве наиболее часто используемого собирательного понятия для расширенного толкования направления, связанного с созданием микросистем, в англоязычной литературе применяют сокращение MST (microsystem technology), что дословно означает «технология микросистем». В России наибольшее распространение получил термин «микросистемная техника (МСТ)» (microsystem engineering), который был в документе "Новые приоритеты науки и техники", утвержденном правительственной комиссией по научно-технической политике.

Микроэлектромеханическими системами (МЭМС) называют устройства с интегрированными в объеме или на поверхности твердого тела электрическими и микромеханическими структурами. Статическая или динамическая совокупность этих структур обеспечивает реализацию процессов генерации, преобразования, передачи энергии и механического движения в интеграции с процессами восприятия, обработки, передачи и хранения информации.

В рамках данного направления создаются миниатюрные чувствительные (сенсорные) и исполнительные (актюаторные) системы, в основе функционирования которых лежит использование классических принципов механики, оптики, электротехники и физики твердого тела.

Целью преподавания дисциплины «Микроэлектромеханика» является формирование знаний в области базовых принципов функционирования и конструирования механических и электромеханических элементов и устройств, реализуемых на микроуровне.

1. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО КОНСОЛЬНОЙ БАЛКОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ

Целью работы является приобретение практических навыков по расчету перемещения микромеханического элемента, совершаемого под действием внешней силы.

На рис. 1 приведена структура консольной балки.



Рис. 1. Структура консольной балки

Под действием внешней силы $F_{внеш}$ консольная балка отклоняется от первоначального положения. По закону Гука силе $F_{внеш}$, действующей на балку, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F_{внеш} = -F_{упр} = ky, \quad (1)$$

где k – коэффициент жесткости (жесткость) консольной балки; y – перемещение, совершаемое балкой под действие силы $F_{внеш}$.

Перемещение y определяется выражением

$$y = l \cdot \sin \gamma, \quad (2)$$

где l – расстояние от якорной области консольной балки до точки приложения внешней силы; γ – угол поворота балки.

При малых углах отклонения (менее 10°): $\sin \alpha = \alpha$, а $\cos \alpha = 1$.

Таким образом, выражения (2) примет следующий вид:

$$y = l \cdot \gamma. \quad (3)$$

Коэффициент жесткости консольной балки (см. рис. 1) определяется с помощью следующего выражения:

$$k_0 = \frac{EJ}{l^3}, \quad (4)$$

где J – осевой момент инерции.

Коэффициент жесткости для s-образного изгиба балки (рис. 2) определяется с помощью выражения:

$$k_1 = \frac{F}{2y} = 4k_0. \quad (5)$$

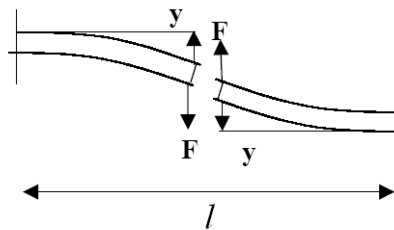


Рис. 2. S-образный изгиб консольной балки

Коэффициент жесткости микромеханической структуры, представленной на рис. 3, определяется следующим выражением:

$$k_2 = 0.5k_1 = 2k_0. \quad (6)$$

На рис. 4. представлен упругий подвес микромеханических резонаторов.

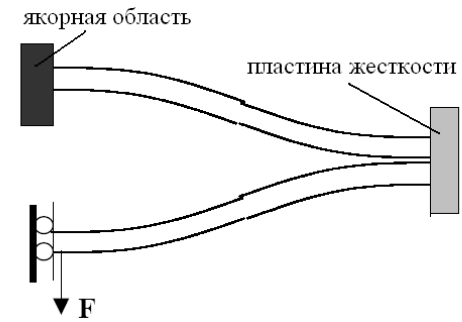


Рис. 3. Микромеханическая структура

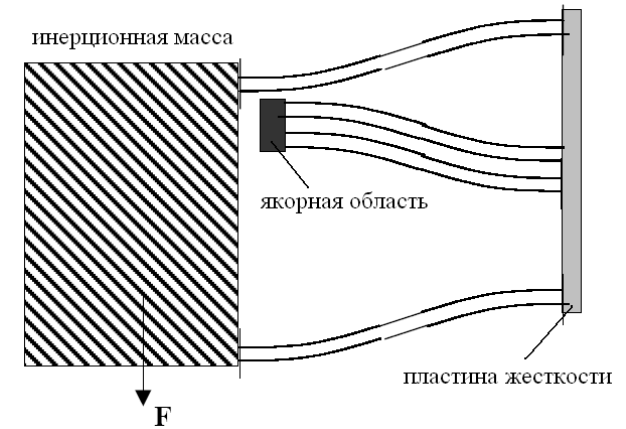


Рис. 4. Упругий подвес микромеханических резонаторов

Коэффициент жесткости микромеханической структуры, представленной на рис. 4, определяется выражением

$$k_3 = 2k_2 = 4k_0. \quad (7)$$

Осевым моментом инерции сечения относительно данной оси называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадрат их расстояний до данной оси (например, X или Y), которая распространяется на всю площадь сечения A. Так, осевые моменты инерции (рис. 5) относительно осей X и Y равны:

$$J_x = \int_A y^2 \cdot dA; \quad (8)$$

$$J_y = \int_A x^2 \cdot dA. \quad (9)$$

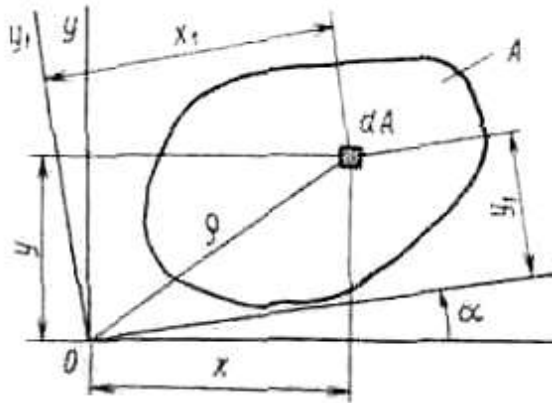


Рис.5. Осевой момент инерции

Осевые и полярный моменты инерции всегда положительны и выражаются в см^4 или м^4 .

Полярным моментом инерции сечения относительно данной точки (полюс O) называется сумма произведений элементарных площадей dA на квадраты их расстояний до этой точки, которая распространяется на всю площадь сечения A. Следовательно,

$$J_\rho = \int_A \rho^2 \cdot dA. \quad (10)$$

Отметим интересное свойство: полярный момент инерции J_ρ равен сумме осевых моментов инерции J_x и J_y относительно любой пары взаимно перпендикулярных осей X и Y, проходящих через полюс O.

Действительно, как видно из рис. 5, $\rho^2 = x^2 + y^2$, и

$$J_\rho = \int_A \rho^2 \cdot dA = \int_A (x^2 + y^2) \cdot dA = \int_A x^2 \cdot dA + \int_A y^2 \cdot dA = J_y + J_x. \quad (11)$$

Если оси X и Y повернуть относительно полюса O на некоторый угол α (см. рис.5), то $\rho^2 = x_1^2 + y_1^2$ и, следовательно, $J_\rho = J_{x1} + J_{y1}$, т. е. при любом повороте осей относительно начала координат (полюса O) сумма осевых

моментов инерции остается постоянной:

$$J_x + J_y = J_{x1} + J_{y1} = J_\rho = const. \quad (12)$$

Центробежным моментом инерции сечения относительно осей координат (например, осей X и Y) называется сумма произведений элементарных площадей dA на их расстояния до этих осей, которая распространяется на всю площадь сечения A. Таким образом,

$$J_{xy} = \int_A x \cdot y \cdot dA. \quad (13)$$

Центробежный момент инерции J_{xy} выражается в см^4 или м^4 и может быть положительным, отрицательным и равным нулю в зависимости от положения сечения относительно осей координат.

Если сечение занимает положение относительно осей X и Y, как показано на рис. 6, а, то в этом случае $J_{xy} > 0$, так как координаты X и Y положительны. Повернем оси координат на 90° против хода часовой стрелки (рис. 6, б). Теперь $J_{xy} < 0$, так как $x > 0$, а $y < 0$. Отсюда следует, что при повороте осей на некоторый угол $\alpha < 90^\circ$ центробежный момент может быть равен нулю: $J_{xy} = 0$.

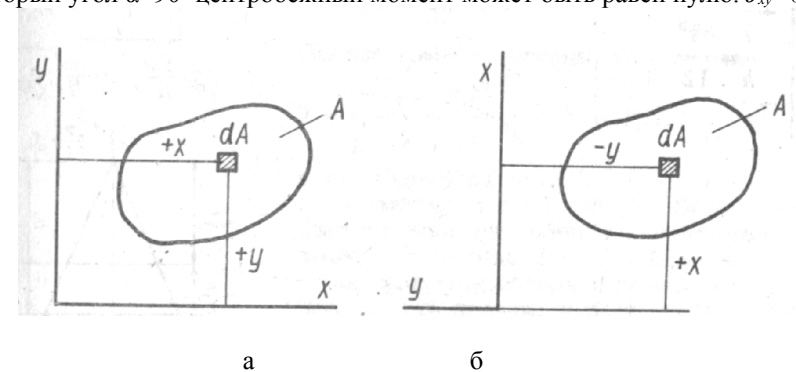


Рис. 6. Центробежный момент инерции

Для некоторых сечений можно сразу указать оси, относительно которых $J_{xy} = 0$. Рассмотрим сечение, имеющее ось симметрии (рис. 7). Центробежные моменты инерции полусечений, расположенные по разные стороны от оси y , равны между собой, но отличаются знаками. Следовательно, $J_{xy} = 0$.

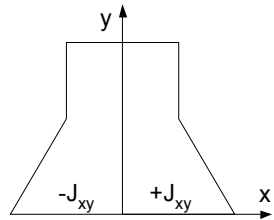


Рис. 7. Центробежный момент инерции для симметричных сечений

Момент инерции зависит от вида сечения консольной балки (рис. 8).

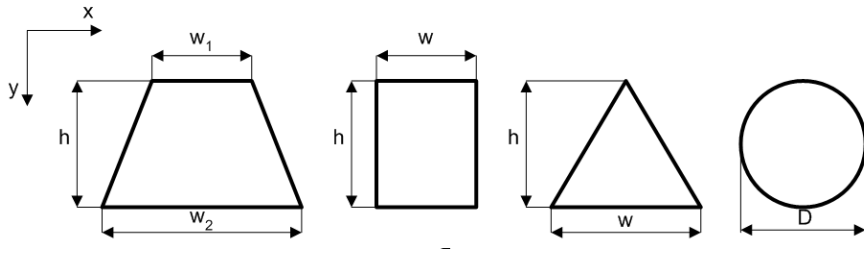


Рис. 8. Виды сечения балки

Осей момент инерции для консольной балки с трапециевидным сечением будет определяться следующими выражениями:

$$J_{\text{трапеция } x} = \frac{(w_1 + w_2) \cdot (w_1^2 + w_2^2)}{48} \cdot h; \quad (14)$$

$$J_{\text{трапеция } y} = \frac{(w_1 + w_2)}{24} \cdot h^3, \quad (15)$$

где h – толщины консольной балки.

Ширина поверхности и ширина основания консольной балки с трапециевидным сечением связаны следующим выражением:

$$w_1 = w_2 - 2 \cdot h \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (16)$$

где ϕ – угол травления материала консольной балки (для кремния $\phi = 54,7^\circ$).

Осей момент инерции для консольной балки с прямоугольным сечением будет определяться выражениями:

$$J_{\text{прямоугольник}_x} = \frac{h \cdot w^3}{12}; \quad (17)$$

$$J_{\text{прямоугольник}_y} = \frac{w \cdot h^3}{12}, \quad (18)$$

где w – ширина консольной балки.

Осевой момент инерции для консольной балки с треугольным сечением будет определяться следующими выражениями:

$$J_{\text{треугольник}_x} = \frac{h \cdot w^3}{48}; \quad (19)$$

$$J_{\text{треугольник}_y} = \frac{w \cdot h^3}{36}. \quad (20)$$

Механические свойства материалов, используемых в качестве структурных материалов элементов МЭМС, приведены в табл.1.

Таблица 1

Механические свойства материалов, используемых в качестве структурных в микроэлектромеханических системах

п/п материал	Модуль Юнга (E), ГПа	Модуль сдвига (G), ГПа	Коэфф. Пуассона (μ)	Плотность (ρ), кг/м ³
Кремний (Si)				
<001>	130	50	0,28	2320
<011>	150	70	0,06	
<010>	130	50	0,28	
Поликремний (poly Si)	169	69	0,22	2100
Карбид кремния (SiC)				
<001>	270	103	0,31	3200
<011>	350	162	0,08	
<010>	270	103	0,31	

В данной работе необходимо рассчитать и построить следующие графики:

– зависимость перемещения консольной балки от внешней силы (

$$y = f(F_{\text{внеш}});$$

- зависимость перемещения консольной балки от ее длины ($y = f(l)$);
- зависимость перемещения консольной балки от ее толщины ($y = f(h)$);
- зависимость перемещения консольной балки от ее ширины ($y = f(w)$).

2. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО КОНСОЛЬНОЙ БАЛКОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Целью данного практического занятия является приобретение практических навыков по расчету перемещения микромеханического элемента электростатического актюатора.

На рис. 9 приведена структура микромеханического переключателя с электростатической активацией.



Рис. 9. Структура микромеханического переключателя

При подаче отклоняющего напряжения на электрод относительно консольной балки на часть консольной балки, расположенной над этим электродом, начинает действовать электростатическая сила, определяемая выражением:

$$dF_{\text{эл}} = E \cdot dq, \quad (21)$$

где E – напряженность электрического поля; q – заряд электрона.

Поскольку

$$dq = C \cdot dU; \quad (22)$$

$$E = \frac{U}{d}, \quad (23)$$

выражение (21) примет вид

$$dF_{эл} = \frac{C}{d} \cdot U \cdot dU, \quad (24)$$

то электростатическая сила, действующая на консольную балку, будет определяться следующим выражением:

$$F_{эл} = \frac{C}{d} \cdot \int_0^U U \cdot dU = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot d}, \quad (25)$$

где C – емкость, создаваемая электродом и частью консольной балки, расположенной над ней; U – отклоняющее напряжение.

Емкость электростатического актюатора, создаваемого частью консольной балки и электродом, определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (26)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость воздушного зазора; ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); S – площадь части консольной балки, находящейся над электродом, определяемая выражением

$$S = l_2 \cdot w, \quad (27)$$

где l_2 – длина электрода.

Подставив (26) и (27) в (25), получим:

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d^2} U^2. \quad (28)$$

Под действием электростатической силы $F_{эл}$ консольная балка отклоняется от первоначального положения. По закону Гука силе $F_{эл}$, действующей на балку, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению.

Однако при подаче отклоняющего напряжения U консольная балка начинает притягиваться к электроду. По мере отклонения балки от первоначального положения, расстояние d между ней и электродом будет уменьшаться, что, согласно выражению (28), приведет к увеличению электростатической силы $F_{эл}$. Увеличение электростатической силы повлечет большее отклонение консольной балки от первоначального положения, что приведет к замыканию бал-

ки и электрода. Следовательно, при расчете электростатической силы, действующей на консольную балку, необходимо учитывать уже совершенное отклонение.

Таким образом, выражение (28) примет вид

$$F_{эл} = - \frac{1}{2} \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{(d - y)^2} U^2 . \quad (29)$$

В данной работе необходимо рассчитать и построить следующие графики:

- зависимость перемещения консольной балки от расстояния между электродом и консольной балкой ($y = f(d)$);
- зависимость перемещения консольной балки от расстояния между якорной областью и электродом ($y = f(l_1)$);
- зависимость перемещения консольной балки от длины электрода ($y = f(l_2)$);
- зависимость перемещения консольной балки от ее толщины ($y = f(h)$);
- зависимость перемещения консольной балки от напряжения, приложенного к консольной балке относительно электрода ($y = f(U)$);
- зависимость перемещения консольной балки от ее ширины ($y = f(w)$).

3. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ СИЛ

Целью данной работы является приобретение практических навыков по расчету относительной линейной деформации микромеханических элементов.

Деформацией твердого тела называется изменение его размеров и объема:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} , \quad (30)$$

где Δl – абсолютное удлинение; l – первоначальный размер тела (рис. 10).

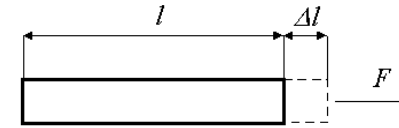


Рис. 10. Изменение линейных размеров балки под действием силы

Деформация, вызванная изменением продольного размера тела, называется относительной продольной деформацией:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\Delta l}{l}. \quad (31)$$

Деформация, вызванная изменением поперечных размеров тела, называется относительной поперечной деформацией:

$$\varepsilon_{\text{попер}} = -\frac{\Delta w}{w}, \quad (32)$$

где Δw – абсолютная поперечная деформация; w – первоначальный размер тела.

Напряжением называется физическая величина, равная упругой силе, приходящейся на единицу площади сечения тела:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (33)$$

где F – сила; S – площадь сечения.

Закон Гука: Сила растяжения или сжатия, приложенная к телу в форме стержня, вызывает изменение длины тела Δl . Величина Δl зависит от размеров стержня, материала и величины приложенной силы:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (34)$$

где E – модуль Юнга.

Закон Гука выполняется только в области упругих деформаций.

Абсолютное значение отношения относительной поперечной деформации $\varepsilon_{\text{попер}}$ к относительной продольной деформации $\varepsilon_{\text{прод}}$ при растяжении или сжатии в области действия закона Гука, называется коэффициентом Пуассона:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{прод}}} \right|. \quad (35)$$

Если на тело вдоль его оси действует некоторая внешняя сила (см. рис. 10), то согласно закону Гука относительная продольная деформация будет определяться следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{прод}} = \frac{\sigma_{\text{прод}}}{E}. \quad (36)$$

Относительная поперечная деформация определяется выражением

$$\varepsilon_{\text{попер}} = -\frac{\sigma_{\text{попер}}}{E}. \quad (37)$$

Однако, согласно условию, внешняя сила действует только в направлении оси тела, т.е. $\sigma_{\text{попер}} = 0$. Таким образом, относительную поперечную деформацию необходимо выразить через напряжение $\sigma_{\text{прод}}$.

Подставив (36) в (35), получим

$$\varepsilon_{\text{попер}} = -\mu \cdot \frac{\sigma_{\text{прод}}}{E}. \quad (38)$$

Если на тело действуют внешние силы вдоль осей X, Y, Z (рис. 11), то относительная деформация тела по этим осям будет уже зависеть от всех действующих на тело сил.

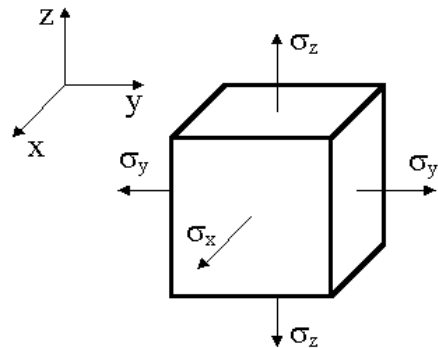


Рис. 11. Действие внешних сил на тело

Рассмотрим ось X (см. рис. 11). От действия напряжения σ_x , действующего вдоль оси X, относительная линейная деформация по оси X составит

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}. \quad (39)$$

От действия напряжения σ_y , действующего вдоль оси Y, относительная линейная деформация по оси X составит

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_y}{E}. \quad (40)$$

От действия напряжения σ_z , действующего вдоль оси Z, относительная линейная деформация по оси X составит

$$\varepsilon_x = -\mu \cdot \frac{\sigma_z}{E}. \quad (41)$$

Таким образом, относительная деформация вдоль оси X будет определяться следующим выражением:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_x - \mu \cdot (\sigma_y + \sigma_z) \right]. \quad (42)$$

Аналогично получаем выражения для относительной линейной деформации по осям Y, Z:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_y - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_z) \right]; \quad (43)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot \left[\sigma_z - \mu \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \right]. \quad (44)$$

Выражения (42)-(44) представляют собой обобщенный закон Гука.

В данной работе необходимо выполнить следующие действия:

1. Рассчитайте величину абсолютного удлинения тела по осям X, Y, Z при заданных внешних воздействиях.

2. Рассчитайте силы, которые необходимо приложить к двум граням тела (по осям X,Y; X,Z; Y,Z) для получения заданных абсолютных удлинений. Постройте графики зависимости сил от заданных абсолютных удлинений:

$$F_{x,y,z} = f(i, j),$$

где x, y, z – оси; i, j – заданные абсолютные удлинения балки по соответствующим осям.

3. Постройте график зависимости абсолютного удлинения тела по оси (Z ; Y ; X), вдоль которой $F = 0$, от рассчитанных сил.

4. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Целью работы является приобретение практических навыков по расчету динамических характеристик микроэлектромеханических элементов.

На рис. 12 приведена структура гребенчатого электростатического актюатора.

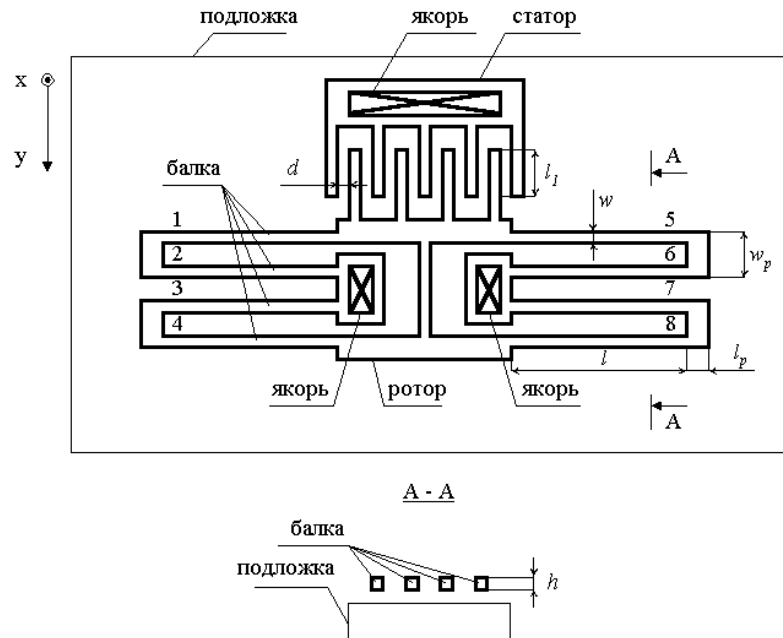


Рис. 12. Структура гребенчатого электростатического актюатора

При подаче напряжения на статор относительно ротора, на последний начинает действовать электростатическая сила, определяемая выражением (рис. 13)

$$F_{эл} = \frac{1}{2} \frac{dC}{dx} U^2, \quad (45)$$

где x – смещение пластин емкости электростатического актюатора.

Емкость электростатического актюатора, создаваемого пальцами гребенок статора и ротора, определяется выражением

$$C = 2 \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (46)$$

где d – расстояние между пальцами гребенок статора и ротора (зазор); S – площадь перекрытия пальцев гребенок ротора и статора:

$$S = l_1 \cdot h, \quad (47)$$

где l_1 – длина перекрытия пальцев гребенок ротора и статора (см. рис. 12); h – толщина структурного слоя актюатора.

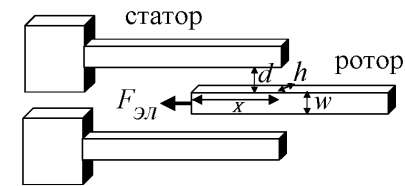


Рис. 13. Структура гребенчатого актюатора

Подставив (46) и (47) в (45), получим

$$F_{эл} = n \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{d} U^2, \quad (48)$$

где n – количество пальцев на роторе.

Под действием силы $F_{эл}$ ротор отклоняется от первоначального положения. По закону Гука, силе $F_{эл}$, действующей на ротор, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$ упругого подвеса, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F_{эл} = -F_{упр} = k_s \cdot y, \quad (49)$$

где k_s – жесткость упругого подвеса; y – перемещение, совершаемое упругим подвесом под действие силы $F_{эл}$.

Упругий подвес образован четырьмя параллельно соединенными парами балок: 1-2, 3-4, 5-6, 7-8. Консольные балки в парах соединены последовательно.

Жесткость пары последовательно соединенных консольных балок определяется следующим выражением:

$$k_{\text{парал}} = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}, \quad (50)$$

где k_1, k_2 – жесткости первой и второй балки, соответственно.

Жесткость параллельно соединенных пар консольных балок определяется выражением

$$k_{\text{послед}} = k_{\text{парал}_1} + k_{\text{парал}_2}, \quad (51)$$

где $k_{\text{парал}_1}, k_{\text{парал}_2}$ – жесткость пары параллельно соединенных консольных балок.

Собственная угловая частота упругого подвеса гребенчатого электростатического актюатора определяется следующим выражением

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}, \quad (52)$$

где m_s – масса упругого подвеса, определяемая выражением:

$$m_s = 8 \cdot m_{\text{балки}} + 4 \cdot m_p, \quad (53)$$

где $m_{\text{балки}}$ – масса консольной балки; m_p – масса соединений консольных балок.

Масса определяется следующим выражением:

$$m = \rho \cdot V, \quad (54)$$

где ρ – плотность структурного материала; V – объем.

Частота свободных колебаний упругого подвеса

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi}. \quad (55)$$

Резонансная угловая частота упругого подвеса определяется следующим выражением:

$$\omega_{\text{рез}}^2 = \omega_0^2 - 2 \cdot \delta^2, \quad (56)$$

где δ – коэффициент затухания колебательной системы, который выбирается из следующего условия:

$$\delta < \frac{\omega_0}{\sqrt{2}}. \quad (57)$$

В данной работе необходимо рассчитать и построить следующие графики:

– зависимость электростатической силы от количества пальцев гребенки и расстояния между ними ($F_{эл} = f(n, d)$);

– зависимость коэффициента жесткости упругого подвеса микромеханического резонатора от длины балок ($k_s = f(l)$);

– зависимость собственной угловой частоты упругого подвеса от длины балок ($\omega_0 = f(l)$);

– зависимость собственной частоты упругого подвеса от длины балок ($f_0 = f(l)$);

– зависимость резонансной частоты упругого подвеса от длины балок ($w_{рез} = f(l)$).

5. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Целью работы является приобретение практических навыков по расчету деформации микромеханических элементов при нагреве.

Если при однородном нагреве температура твердого тела возрастает на ΔT , то тело испытывает деформацию, описываемую следующим выражением:

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T, \quad (59)$$

где α – коэффициент теплового расширения.

Подставив выражение (30) в (59), получим:

$$\Delta l = l \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (60)$$

где l – первоначальная длина.

Подставив (59) и (33) в (34), получим

$$F = w \cdot h \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (61)$$

где w – ширина тела; h – толщина тела.

На рис. 14 представлен термоактюатор.

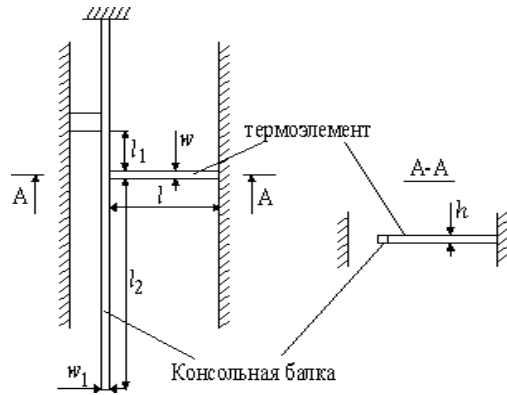


Рис. 14. Термоактюатор

Под действием силы F консольная балка отклоняется от первоначального положения. По закону Гука силе F , действующей на балку, будет противодействовать сила упругости $F_{упр}$, равная по модулю внешней силе и противоположная по направлению:

$$F = -F_{упр} = ky_0, \quad (62)$$

где k – жесткость консольной балки; y_0 – перемещение, совершаемое балкой под действием силы F .

Момент инерции зависит от сечения балки. При прямоугольном сечении консольной балки, момент инерции будет определяться следующим выражением:

$$I_{np_y} = \frac{h \cdot w_1^3}{12}, \quad (63)$$

где w_1 – ширина консольной балки.

Угол, на который совершает поворот балка под действием силы F , определяется следующим выражением:

$$\gamma = \frac{y_0}{l_1}. \quad (64)$$

Таким образом, свободный конец консольной балки переместится на расстояние, определяемое следующим выражением:

$$y = \left(l_1 + w + l_2 \right) \cdot \gamma, \quad (65)$$

где l_2 – длина балки от термоэлемента до ее свободного конца.

В данной работе необходимо рассчитать и построить следующие графики:

– зависимость перемещения, совершаемого балкой под действием силы F , от ее ширины и ширины термоэлемента ($y_0 = f(w, w_1)$);

– зависимость перемещения, совершаемого балкой под действием силы F , от температуры ($y_0 = f(\Delta T)$);

– зависимость перемещения свободного конца консольной балки от температуры ($y = f(\Delta T)$).

Рассчитайте величину абсолютного удлинения балки по осям X, Y, Z при нагреве.

6. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО П-ОБРАЗНЫМ АКТЮАТОРОМ

Целью выполнения работы является приобретение практических навыков по расчету перемещений, совершаемых П-образным.

На рис. 1 приведена структура П-образного термоактюатора.

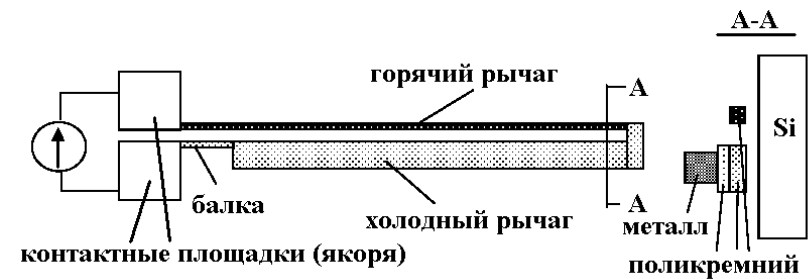


Рис. 15. П-образный термоактюатор

При нагревании происходит перемещение структуры термоактюатора за счет разницы абсолютных удлинений горячего и холодного рычагов (рис. 16).

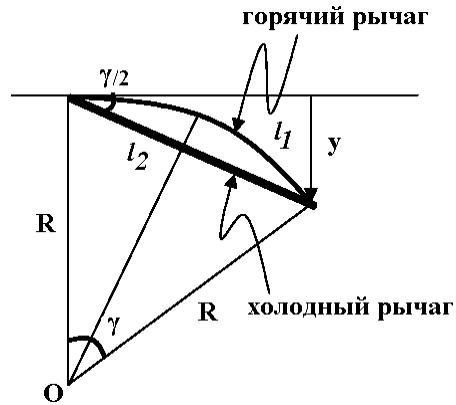


Рис. 16. Модель движения структуры П-образного термоактюатора

Длина горячего рычага после нагревания определяется выражением

$$l_1 = R \cdot \sin \gamma = R \cdot \gamma, \quad (66)$$

где R – радиус изгиба горячего рычага; γ – угол изгиба горячего рычага.

Длина холодного рычага остается постоянной и определяется следующим выражением:

$$l_2 = 2 \cdot R \cdot \sin(\gamma / 2). \quad (67)$$

Абсолютное удлинение горячего рычага можно определить из того, что до нагревания длины горячего и холодного рычагов были одинаковыми:

$$\Delta l_1 = l_1 - l_2 = R \cdot \gamma - 2 \cdot R \cdot \sin(\gamma / 2). \quad (68)$$

Относительная деформация горячего рычага определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_1}{l_1} = \frac{\gamma - 2 \cdot \sin(\gamma / 2)}{2 \cdot \sin(\gamma / 2)} = \alpha_T \cdot T, \quad (69)$$

где α_T – коэффициент линейного расширения материала; T – температура.

Угол изгиба горячего рычага определяется с помощью выражения Тейлора:

$$\gamma^2 = 24 \cdot \alpha \cdot T. \quad (70)$$

Перемещение, совершаемое П-образным термоактюатором определяется выражением

$$y = l_2 \cdot \sin(\gamma / 2) = (2 \cdot R \cdot \sin(\gamma / 2)) \cdot \sin(\gamma / 2). \quad (71)$$

В данной работе необходимо рассчитать и построить следующие графики:

- зависимость перемещения от температуры ($y = f(T)$);
- зависимость перемещения от длины холодного рычага ($y = f(l_2)$).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ

1. Ознакомиться со сведениями, изложенными в данном учебно-методическом пособии.
2. Получить у преподавателя вариант задания.
3. Произвести необходимые расчеты.
4. Показать результаты расчетов преподавателю.
5. Оформить отчет о выполнении практического задания.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приведите выражения для расчета коэффициента жесткости консольной балки.
2. Приведите выражения для расчета коэффициент жесткости балки, испытывающей s-образный изгиб.
3. Осевой момент инерции сечения.
4. Полярный момент инерции сечения.
5. Центробежный момент инерции сечения.
6. Приведите выражения для расчета осевого момента инерции для консольной балки с трапециевидным сечением.
7. Приведите выражения для расчета осевого момента инерции для консольной балки с прямоугольным сечением.
8. Приведите выражения для расчета осевого момента инерции для консольной балки с треугольным сечением.
9. Приведите выражения для расчета электростатической силы, создаваемой планарным актюатором.
10. Приведите выражения для расчета электростатической силы, создаваемой гребенчатым актюатором.
11. Закон Гука.
12. Обобщенный закон Гука.
13. Относительная деформация твердого тела.
14. Приведите выражения для расчета относительной тепловой деформации.
15. Механическое напряжение.
16. Коэффициент Пуассона.

17. Приведите выражения для расчета жесткости двух последовательно соединенных балок.
18. Приведите выражения для расчета жесткости двух параллельно соединенных балок.
19. Приведите выражения для расчета собственной частоты колебаний микромеханических элементов.
20. Приведите выражения для расчета резонансной угловой частоты колебаний микромеханических элементов.
21. Приведите выражения для расчета силы, создаваемой термоактюатором.
22. Приведите выражения для расчета угла изгиба горячего рычага П-образного актюатора.
23. Приведите выражения для расчета относительной деформации горячего рычага П-образного актюатора.
24. Приведите выражения для расчета перемещения, совершаемое П-образным актюатором.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Е.Б. Механцев, И.Е. Лысенко. Физические основы микросистемной техники: Учеб. пособие.– Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004.– 54 с.
2. А.В. Александров, В.Д. Потяпов, Б.П. Державин. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов.– М.: Высшая школа, 1995.– 560 с.
3. В.И. Бутенко, А.Д. Захарченко, И.В. Косов, Д.Л. Ретивова, А.А. Сущенко. Механика машин, механизмов и приборов. Информационно-справочное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.– 248 с.
4. Х. Кухлинг. Справочник по физике: Пер. с нем.– М.: Мир. 1982.– 520с.
5. И.В. Савельев. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т.1. Механика. Молекулярная физика.– 3-е изд., испр.– М.: Наука, 1986.– 432 с.
6. Б.Н. Бушманов, Ю.А. Хромов. Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1971. – 224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО КОНСОЛЬНОЙ БАЛКОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ.....	3
2. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО КОНСОЛЬНОЙ БАЛКОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕК- ТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛЫ.....	9
3. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНИХ СИЛ.....	12
4. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ..	15
5. РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	19
6. РАСЧЕТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, СОВЕРШАЕМОГО П-ОБРАЗНЫМ АКТЮАТОРОМ.....	20
ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ. 22	
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	24

**Лысенко Игорь Евгеньевич
Полищук Елена Викторовна
Хайрулина Виктория Александровна**

Учебно-методическое пособие

**Сборник практических работ по курсу
Микроэлектромеханика**

Ответственный за выпуск *Лысенко И.Е.*
Редактор *Надточий З.И.*
Корректор *Чиканенко Л.В.*

ЛР 020565 от 23 июня 1997 г.
Печать офсетная
Формат 60 * 84^{1/16}
Усл. п. л. – 1,7.
Заказ N _____

Подписано к печати _____
Бумага офсетная
Уч.- изд. л. – 1,5.
Тираж 150 экз.

“С”

Издательство Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Некрасовский, 44

Типография Технологического института
Южного федерального университета
ГСП 17А, Таганрог, 28, Энгельса, 1