

Микроэлектромеханические системы в медицине

В. Н. Шоффа, Е. Г. Бандорина

Национальный исследовательский университет МЭИ, Россия,
e-mail: shoffavn@mail.ru

Представлен обзор МЭМС и биоМЭМС, областей их применения, конструкций, разработок микрозеркал, а также результаты аналитического расчета и расчета в программе Comsol Multiphysics микрозеркала с тепловым приводом.

Ключевые слова: микросистемная техника, МЭМС, биоМЭМС, микрозеркало, биметаллическая пластина, тепловой привод.

Введение

В современном мире все большее внимание уделяется вопросам миниатюризации. Эта тенденция не обошла и сферу электрических и электронных аппаратов. В ходе активного совершенствования микроэлектроники и нанотехнологий одним из наиболее бурно развивающихся научно-технических направлений стала микросистемная техника [1], в частности микроэлектромеханические системы (МЭМС).

В общем случае под МЭМС понимаются различные преобразователи, характеризующиеся размерами порядка десятков-сотен микрон и соответствующими перемещениями [2]. Они применяются в авиационной, космической, автомобильной, химической отраслях промышленности, энергетике, фармацевтике, медицине (рис. 1) в качестве разнообразных датчиков: уровня, давления, движения, температуры, а также в акселерометрах, гироскопах, микрофонах и др. [1]. Одно из перспективных направлений МЭМС — различные коммутаторы электрических сигналов, в частности высокочастотные переключатели [3].

В настоящее время мировой рынок устройств МЭМС быстро развивается. Так, например, по данным фирмы iSupply [2], в период с 2007 года по 2013 рынок микроэлектромеханических акселерометров, применяемых



Рис. 1. Распределение продаж МЭМС по отраслям.

в автомобилях, промышленности, медицине, вырос с \$947,7 млн. до \$1,7 млрд. и в настоящее время продолжает увеличиваться. В связи с этим возросли требования к механической и коммутационной износостойкости и надежности рассматриваемых систем. Важными параметрами стали массогабаритные показатели, стоимость, энергопотребление и многое другое [2]. Поэтому необходимо более детальное изучение существующих МЭМС-устройств для увеличения точности и улучшения стабильности их работы, а также создание новых конструкций, показатели качества которых были бы значительно выше известных.

Способность МЭМС преобразовывать механическую энергию в электрические или оптические сигналы и наоборот была использована в одной из наиболее ответственных отраслей человеческой сферы деятельности — в медицине. Диагностические и лечебные устройства размером 20—100 мкм с интегрированными микроэлектронными и микроэлектромеханическими компонентами получили название биомедицинских микроэлектромеханических систем (биоМЭМС).

Широкая область применения биоМЭМС обусловила большой диапазон возможных конструкций. Однако теоретический и экспериментальный анализ их весьма скромнен [4—11]. Предметом исследования данной работы является устройство биоМЭМС, которое представляет собой микрзеркало с термоприводом в виде биметаллических пластин, деформирующихся под действием протекающего по ним электрического тока, и используется в аппарате для оптической когерентной томографии [4]. В работе проанализированы известные конструкторские решения [4—11], приведен расчет функциональной характеристики одного из видов термопривода и изложены проблемные задачи его проектирования.

Биомедицинские микроэлектромеханические системы и их применение

Устройства биоМЭМС представляют собой многофункциональные аппараты, использующие для своего конструирования и работы элементы различных областей науки: оптики, механики, акустики, электроники, теплотехники, химии, биологии [1] и имеющие широкую область применения и большие перспективы развития.

Классифицировать устройства биоМЭМС по их назначению можно следующим образом [12]: устройства для контроля за состоянием пациента, аппараты диагностической визуализации, средства ухода за больными, оборудование диагностики в лабораторных условиях, устройства доставки лекарственных средств в организм человека.

В области контроля за состоянием пациента разработаны одноразовые устройства для анализа крови в домашних условиях и многообразные системы анализа в лабораториях, аппараты искусственной вентиляции легких, гироскопы для анализа движения человека, инфракрасные датчики температуры [12]. К аппаратам диагностической визуализации относятся разнообразные микроспектрометры, эндоскопы, устройства для получения рентгенограмм и многое другое [12].

С появлением в медицине разнообразных миниатюрных датчиков (часто беспроводных) стало возможным дистанционно наблюдать за состоянием пациента и при необходимости вводить в организм требуемые

медикаменты, производить минимальные разрезы на коже во время операций. Помимо этого, биоМЭМС применяются в биопротезировании (от глазных протезов до кардиологических устройств), средствах диагностики заболеваний, ингаляторах и многом другом.

Конструкции биоМЭМС с микрозеркалами

Устройства МЭМС отличаются многообразием конструкций. Большой сектор рынка микроэлектромеханических систем занимают микрозеркала. Первоначальные исследования данных устройств относятся к концу 70-х— началу 80-х годов прошлого столетия, однако наиболее динамично технология стала развиваться в 1990-х годах [4]. В настоящее время микрозеркала находят широкое применение как в микросистемах управления, так и в лазерных и оптических дальномерах, используемых в системах ориентации и навигации подвижных объектов по рельефу местности [13], в дисплеях различного назначения, системах медицинского обследования, в частности в аппарате для проведения оптической когерентной томографии (ОКТ) [4].

Оптическая когерентная томография (ОКТ) — высокоточный метод, предназначенный для исследования поврежденных тканей человеческого организма. Разработанный в Массачусетском технологическом университете в конце 80-х годов XX века [4], в настоящее время он применяется в офтальмологии, стоматологии, дерматологии и др. Однако наиболее интересным является применение ОКТ в гастроэнтерологии, где необходимо проводить исследование ткани "изнутри". Основным элементом в методе ОКТ является отражающий элемент, в качестве которого может использоваться микрозеркало.

В настоящее время реализовано множество разнообразных вариантов конструкций микрозеркал. В общем случае, все они представляют собой подвижный механизм, способный изменять угол наклона посредством внешних факторов. Такими факторами могут быть протекание электрического тока, наличие магнитного поля, пьезоэлектрический эффект или эффект теплового расширения. Таким образом, в биоМЭМС могут быть организованы электростатический, магнитный, пьезоэлектрический и тепловой приводы. Рассмотрим некоторые существующие виды приводов микрозеркал.

Электростатический привод представлен на рис. 2 [5]. Конструкция состоит из микрозеркала, подвешенного на пружинных механизмах (рис. 2, *а*) над подложкой (рис. 2, *б*) с четырьмя отдельно управляемыми электродами. Это позволяет при воздействии на них добиваться разных углов отклонения микрозеркала относительно оси вращения. В работах [6, 7] рассмотрено влияние жесткости пружин, поддерживающих микрозеркало, на противодействие зеркалом крутящему моменту при приложении напряжения. Наименьшее сопротивление повороту зеркала оказывают змеевидные пружины [6, 7].

Пьезоэлектрический привод основан на возникновении механических деформаций под действием электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект). Данный вид привода рассмотрен в работе [8].

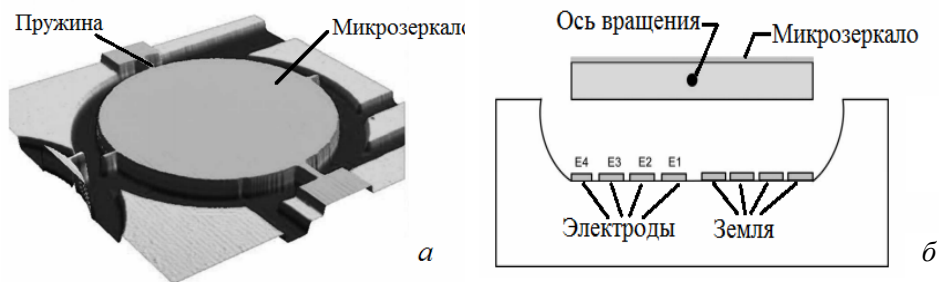


Рис. 2. Общий вид (а) и поперечное сечение устройства с электростатическим приводом (б).

Тепловой привод реализован двумя вариантами конструкций.

1. Используется пластина, выполненная из одного материала разной толщины [9—11]. Данный вид привода основан на асимметричном нагреве приводного устройства. Конструкция состоит из двух компонентов: узкого и широкого плеч (рис. 3). При подаче напряжения протекающий последовательно по плечам конструкции электрический ток из-за большого электрического сопротивления узкого плеча будет нагревать последнее сильнее, чем широкое, что, в свою очередь, вызовет большее удлинение узкого плеча.

2. Используется биметаллическая пластина, состоящая из двух материалов с разными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) α (рис. 4) [4].

При нагревании такой пластины компонент, выполненный из материала с большим ТКЛР (термоактивный компонент), удлиняется на большую величину, чем компонент из материала с меньшим ТКЛР (термоинертный компонент). Данное явление при жестком соединении двух составляющих биметаллического элемента в виде консоли заставляет изгибаться консоль так, что на вогнутой поверхности оказывается пластинка с низким ТКЛР.

Последний вариант привода выбран для анализа в данной работе. Несмотря на ряд недостатков, среди которых более высокое энергопотребление, чем у электростатического привода, и низкая скорость переключения, реализация теплового привода проще, в связи с чем целесообразно его исследование. Выбранная конструкция (рис. 5) [4] состоит из алюминиевого микрозеркала, опирающегося с четырех сторон через пружины на электротепловые актуаторы — биметаллические пластины.

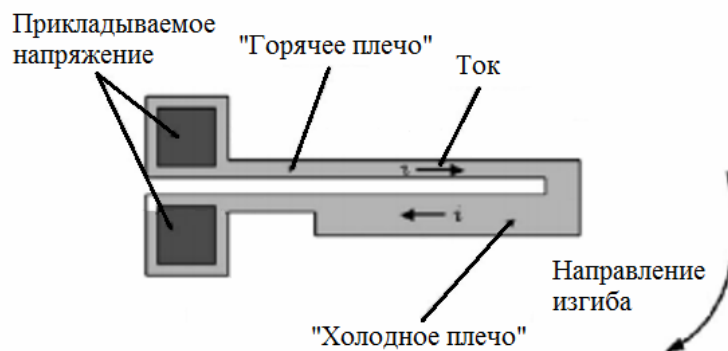


Рис. 3. Конструкция теплового привода в виде пластины из одного материала разной толщины [9].

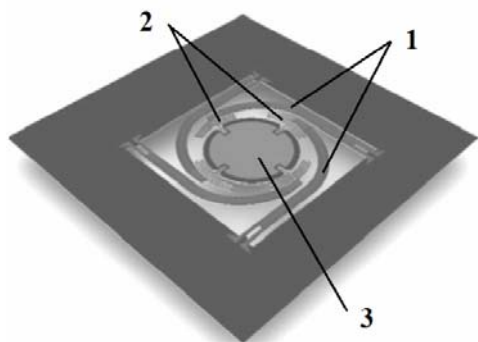


Рис. 4. Микрозеркало с тепловым приводом в виде биметаллических пластин: 1 — биметаллические пластины; 2 — пружины; 3 — зеркало.

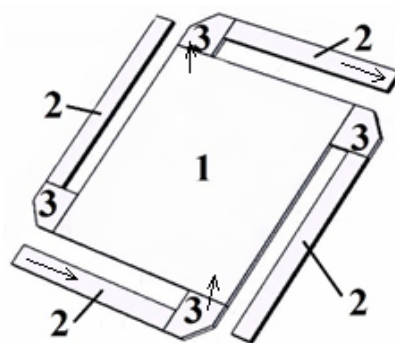


Рис. 5. Эскиз микрозеркала: 1 — алюминиевое микрозеркало; 2 — биметаллические приводы; 3 — пружины.

Приводные устройства представляют собой консольные биметаллические пластины из алюминия и кремния. При нагреве материалы пластин расширяются неравномерно, что вызывает их деформацию (рис. 6). Пружины между биметаллическими пластинами и зеркалом необходимы для уменьшения размеров конструкции, а также для уменьшения противодействия крутящему моменту, создаваемому приводом. Они могут иметь разную форму: от показанной на рис. 6 (довольно жесткую) до упомянутой змеевидной формы.

Кремний в данной конструкции является изоляционным материалом, а алюминий — проводящим, поэтому нагрев можно осуществлять двумя способами.

1. Косвенно, посредством дополнительных нагревательных элементов.

2. Пропуская ток последовательно через алюминиевую часть биметаллической пластины, пружины, микрозеркало и алюминиевую часть биметаллической пластины, расположенной на противоположной стороне зеркала (как показано стрелками на рис. 5).

В данной работе для анализа конструкции выбран второй способ нагрева биметалла.

В изображенной на рис. 6 конструкции верхний слой выполнен из алюминия (ТКЛР α_1 и модуль упругости E_1), нижний — из кремния (соответственно, α_2 и E_2), в связи с чем пластинка при нагреве будет изгибаться вниз. Если все приводные консоли выполнить таким образом, то при протекании тока по противоположно расположенным пластинам микрозеркало будет опускаться. Для осуществления поворота микрозеркала необходимо расположить пластины так, чтобы две из них изгибались вниз, как на рис. 6 (например, верхняя и правая консоли на рис. 5), а две противоположно расположенные — вверх (нижняя и левая на рис. 5). В этом случае слой алюминия должен быть расположен снизу, а слой кремния — сверху.

Аналитический расчет

В расчете предполагалось, что биметаллическая пластина с одинаковой по всей длине площадью прямоугольного поперечного сечения

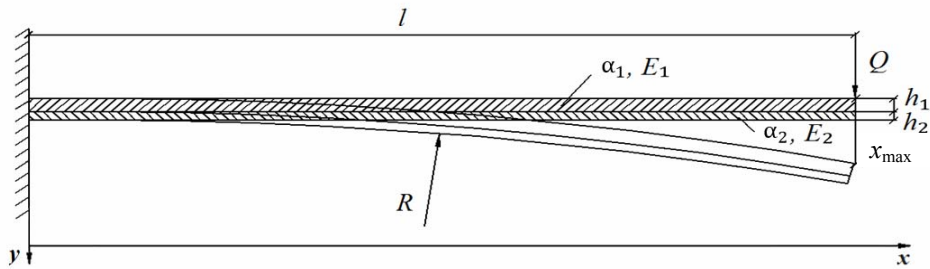


Рис. 6. Изгиб биметаллической пластины при нагреве электрическим током.

(рис. 6) до нагрева проходящим по ней током имела во всех точках температуру окружающей среды t_0 и не была изогнута. Если температуру повысить до значения t , то вследствие превышения температуры нагрева

$$\theta = t - t_0 \text{ (К)} \quad (1)$$

пластина деформируется (рис. 6). А поскольку последняя по всей длине имеет постоянное сечение и температуру нагрева, ее изгиб будет равномерным и после деформации она приобретает форму дуги окружности [14]. Кривизна биметаллической пластины (обратная величина радиусу R этой окружности — рис. 6) при этом определяется простейшей формулой [15]

$$\frac{1}{R} = \frac{3}{2} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\theta}{h} \text{ (1/м)}, \quad (2)$$

если соблюдается соотношение $h_1 / h_2 = \sqrt{E_2 / E_1}$, что и было принято в задании толщин алюминиевого и кремниевого компонентов.

В рассматриваемом варианте (рис. 6) левая часть пластины является жесткозакрепленной, правая — перемещающейся. Перемещение любой произвольной точки по окружности определяется координатами x и y . Известно уравнение для определения координаты произвольной точки пластинки на расстоянии x от места закрепления при соблюдении указанного соотношения толщин двух компонентов пластины [14—16] —

$$x = \frac{3}{4} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\theta}{h} y^2 \text{ (м)}. \quad (3)$$

Очевидно, что наибольшее перемещение x_{\max} будет соответствовать $y = l$:

$$x_{\max} = \frac{3}{4} \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\theta}{h} l^2 \text{ (м)}. \quad (4)$$

Сила, действующая на конец биметаллической пластины при ее нагреве, согласно работе [15], равна

$$Q = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)\theta E b h^2}{16l} \text{ (Н)}. \quad (5)$$

Свойства материалов компонентов биметаллической пластины [4]

Материал	ТКЛР α , $(1/\text{К}) \cdot 10^{-6}$	Модуль упругости E , $(\text{Н}/\text{м}^2) \cdot 10^{11}$
Алюминий Al	23	0,69
Кремний Si	2,6	1,62

При неравенстве модулей упругости компонентов биметалла в (5) рекомендуется использовать их среднее значение [15]:

$$E = \frac{E_1 + E_2}{2} \text{ (Н/м}^2\text{)}. \quad (6)$$

Свойства материалов компонентов биметаллической пластины приведены в таблице. Геометрические размеры биметаллической пластины составляли (мкм): длина l — 400; ширина b — 40; толщина h — 12; толщины алюминиевого h_1 и кремниевого h_2 компонентов — 7,257 и 4,743.

Расчет заключался в том, чтобы при заданной окружающей температуре 20 °С, изменяя температуру нагрева биметалла, получить зависимости силы Q и перемещения x_{\max} от разности температур θ . Результаты аналитического расчета при указанных геометрических размерах биметаллической пластины и данных таблицы представлены в виде соответствующих зависимостей на рис. 7 (зависимости 1). Согласно (4) и (5), при расчетах принималось, что оба компонента нагревались при одинаковой температуре θ . Однако известно, что кремний обладает очень плохой теплопроводностью. Расчеты, проведенные в программе Comsol Multiphysics, показали, что тепло, выделяемое в алюминиевой составляющей при протекании по ней тока, практически не передается в кремниевую составляющую (рис. 8). Этот эффект косвенно был учтен при расчетах Q и x_{\max} принятием в формулах (4) и (5) значения $\alpha_2 = 0$. Результаты представлены на рис. 7 (зависимости 2). Как видно на графиках, расхождение между двумя вариантами аналитического расчета составляет примерно 10%, что соответствует отличию значений α_1 и α_2 в таблице.

Расчет в программе Comsol Multiphysics

Для расчета в этой программе создана модель биметаллической пластины, геометрические размеры которой приведены ранее. Материалы пластин, как и в аналитическом расчете, — алюминий и кремний. Нагрев биметаллической пластины достигается за счет протекания тока I вдоль алюминиевого компонента пластины.

При расчете по программе получены распределения по пластине абсолютной температуры нагрева t и ее деформации. Результаты приведены соответственно на рис. 8 и 9. На рис. 8 максимальному нагреву биметалла ($t = 394$ К) соответствует белый цвет (алюминиевый компонент), минимальному ($t = 293$ К) — темный (кремниевый компонент), что продемонстрировано на шкале температур в правой части рис. 8. Превышение температуры над принятой температурой окружающей среды $t_0 = 20$ °С (~293 К) для алюминиевого компонента составляет примерно 100 К. Кремниевый компонент остается практически ненагретым.

На рис. 9 видно, что материал биметаллической пластины нагружен неравномерно: наибольшее напряжение наблюдается в пограничном слое, что соответствует белому цвету, а наименьшие, нулевые, — ближе к краям (обозначены темным). Результаты полученного расчета соответствуют литературным сведениям [14, 15].

Конечным результатом расчетов по программе Comsol Multiphysics являлась зависимость $x_{\max}(\theta)$ для значений ТКЛР, указанных в таблице

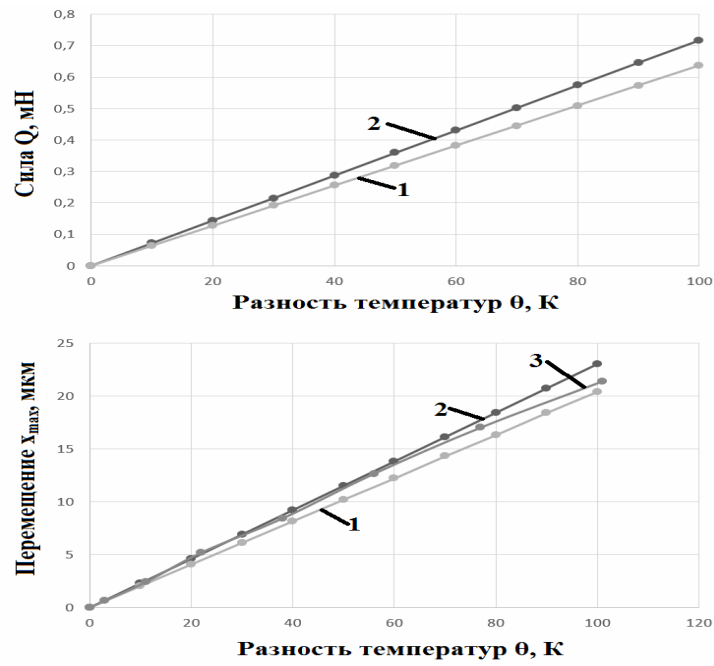


Рис. 7. Зависимости $Q(\theta)$ и $x_{\text{max}}(\theta)$ для значений: 1, 3 — $\alpha_2 = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$; 2 — $\alpha_2 = 0 \text{ 1/K}$; 1, 2 — аналитический расчет; 3 — расчет в Comsol Multiphysics.

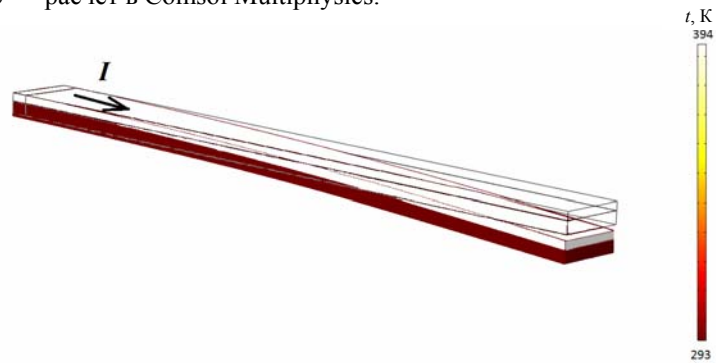


Рис. 8. Температуры нагрева компонентов биметаллической пластины.

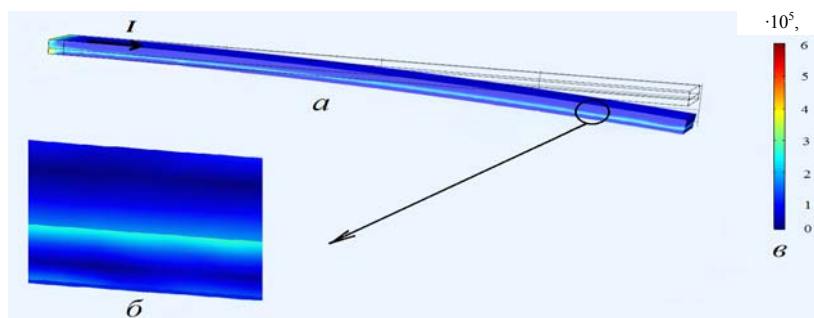


Рис. 9. Деформации биметаллической пластины: a — общий вид деформированной пластины; b — укрупненная часть пластины; v — шкала деформаций.

(зависимость 3 на рис. 7). Расхождение между аналитическим расчетом и расчетом в программе Comsol Multiphysics для одних и тех же значений ТКЛР ($\alpha_1 = 23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ и $\alpha_2 = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) составляет менее 10%.

Выводы

Согласно результатам расчета с использованием компьютерной программы Comsol Multiphysics, при протекании тока по алюминиевому компоненту кремниевый компонент практически не нагревается. Это было учтено при коррекции аналитического расчета. Результаты аналитического расчета и расчета по компьютерной программе отличаются незначительно.

В дальнейшем целесообразно провести анализ противодействия рассмотренному в работе усилию, создаваемому одиночным термометаллическим приводом, со стороны перемещающихся пружин, зеркала и других аналогичных термоприводов. Актуальным является также анализ процесса теплопередачи в реальных конструкциях с учетом среды, в которой расположены элементы микрозеркала. Решение этих задач совместно с результатами настоящей работы является сложной комплексной проблемой.

1. Мухуров Н. И. Электромеханические микроустройства / Н. И. Мухуров, Г. И. Ефимов. — Минск : Навука, 2012. — 267 с.
2. Сысоева С. MEMS-технологии — простое и доступное решение сложных системных задач. — М. : Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2009. — № 7. — С. 80—89.
3. Шоффа В. Н. Высокочастотные микроэлектромеханические переключатели / В. Н. Шоффа, Е. А. Коваленко // Электрические контакты и электроды. — К. : Ин-т пробл. материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, 2014. — С. 220—228.
4. Singh J. Two axes scanning SOI MEMS micromirror for endoscopic bioimaging / J. Singh, J. H. S. Teo, Y. Xu // J. of Micromechanics and Microengineering. — 2007.
5. Yuan Ma. Electrostatic torsional micromirror with enhanced tilting angle using active control methods / Yuan Ma, Ya-Jun Pan // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. — 2011. — 16, is. 6, December. — P. 994.
6. Thomas A. Design and optimization of electrostatically actuated micromirror / A. Thomas, J. Thomas // Proc. from COMSOL conf. Bangalore, 2013.
7. Barillaro G. Analysis, simulation and relative performances of two kinds of serpentine springs / G. Barillaro, A. Molfese, A. Nannini // J. of Micromechanics and Microengineering. — 2005. — February. — P. 736—746.
8. Piefort V. Finite element modelling of piezoelectric active structures // Université Libre de Bruxelles, Belgium, Dept. Mechanical Engineering and Robotics, 2001.
9. Kaur S. Application of thermal actuator / S. Kaur, S. Kaur, S. Punia // Internat. J. of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. — 2013. — 2, is. 10.
10. Pahwa T. Analysis & design optimization of laterally driven poly-silicon electrothermal micro-gripper for micro-objects manipulation / T. Pahwa, S. Gupta, V. Bansal // Proc. from COMSOL conf. Bangalore, 2012.

11. *Varona J.* Modeling of MEMS thermal actuation with external heat source / J. Varona, M. Tecpoyotl-Torres, A. A. Hamoui // IEEE/Fourth congress of Electronics, Robotics and Automotive Mechanics, 2007.
12. *Шурыгина В.* Медицинские МЭМС. Доктор в кармане. — М. : Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2013. — № 5. — С. 169—180.
13. *Лысенко И. Е.* Моделирование внутреннего упругого подвеса микромеханического устройства. — Ростов : Инженерный вестник Дона. — 2010. — № 3.
14. *Кашипар Ф.* Термобиметаллы в электронике / Пер. с чешского Т. Н. Щипановой под ред. К. Н. Мануйловой. — М.—Л. : ГЭИ, 1961.
15. *Балагуров В. А.* Проектирование электрических аппаратов авиационного электрооборудования / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев, А. В. Гордон / Ред. А. Н. Ларионов. — М. : Оборонгиз, 1962. — 515 с.
16. *Пономарев С. Д.* Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. — М. : Машиностроение, 1980. — 326 с.

Мікроелектромеханічні системи в медицині

В. Н. Шоффа, О. Г. Бандоріна

Представлено огляд MEMS і біоMEMS, областей їх застосування, конструкцій, розробок мікродзеркал, а також результати аналітичного розрахунку і розрахунку в програмі COMSOL Multiphysics мікродзеркала з тепловим приводом.

Ключові слова: *мікросистемна техніка, MEMS, біоMEMS, мікродзеркало, біметалічна пластина, тепловий привід.*

Microelectromechanical systems in medicine

V. N. Shoffa, E. G. Bendorina

An overview of MEMS and bioMEMS, their applications, designs, development of micromirrors, and the results of analytical calculation and calculation in the program COMSOL Multiphysics, micromirror with thermal actuator is given.

Keywords: *microsystem technology, MEMS, bioMEMS, micromirror, bimetallic strip, thermal actuator.*