

УДК 621.486

Д. В. К о з л о в, И. П. С м и р н о в,  
А. А. Ж у к о в, В. А. Ш а х н о в

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕГО ЭЛЕМЕНТА ТЕПЛОВЫХ МИКРОАКТЮАТОРОВ

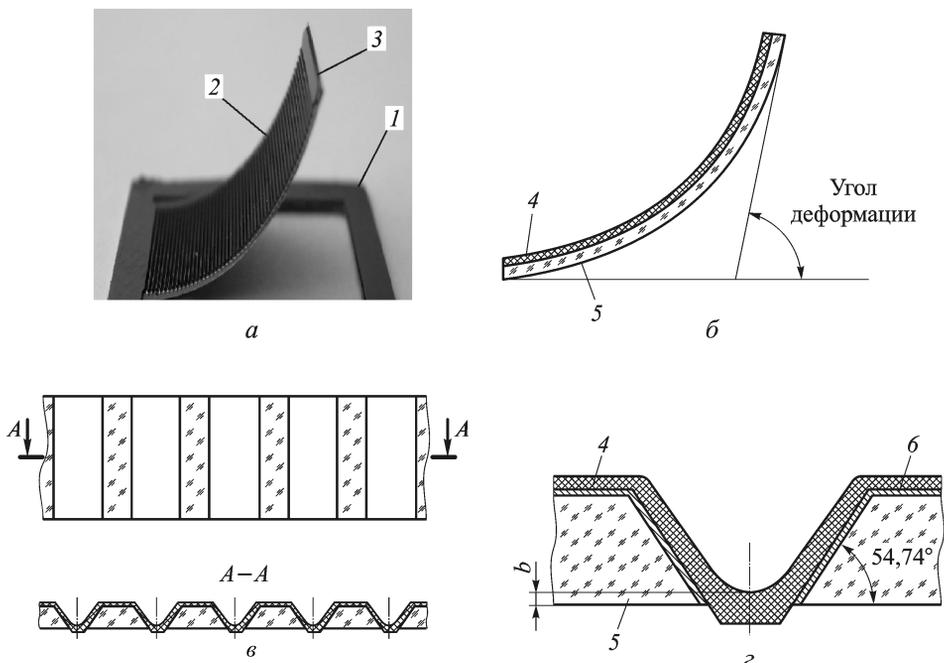
*Рассмотрена методика измерения силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов, подвергаемых воздействию контролируемой нагрузки. Методика реализована с использованием высокоточных прецизионных весов и гониометра. Проведены серии испытаний и экспериментально получены максимальные значения нагрузок, возникающих на хвостовике балки теплового микроактюатора. Исследованы зависимости силовых характеристик от толщины напыленного слоя металла и толщины полиимида в канавке микроактюатора, а также деградация силовых характеристик при многоцикловом изгибе тепловых микроактюаторов с контролируемым содержанием нанотрубок и без них.*

**E-mail: risc3@mail.ru; mf77-1@yandex.ru;  
and\_zhukov@mail.ru; shakhnov@iu4.bmstu.ru**

**Ключевые слова:** тепловой микроактюатор, нагрузка, сила, кремний, полиимид, деформация.

Микроактюаторы применяются в качестве исполнительных механизмов микроэлектромеханических и микроробототехнических систем. Они обеспечивают микроперемещения и управляемую деформацию, применяются в сенсорных системах, преобразуют деформацию в изменение электрического сигнала. В настоящее время разработано большое число микроактюаторов, отличающихся по конструкции (балочные, роторные, мембранные, гребешковые) и способу активации движения подвижных элементов (магнитные, пьезоэлектрические, термомеханические, электростатические и др.) [1, 2]. Известно, что максимальное значение нагрузки и деформации развивают тепловые микроактюаторы, функционирующие на основе биморфного эффекта [3]. Одной из наиболее важных характеристик тепловых микроактюаторов является нагрузочная способность на хвостовике, так как она в первую очередь определяет возможные сферы применения устройства. В связи с этим разработка методики измерения силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов является актуальной задачей.

В настоящей работе приведена методика измерения силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов на основе структуры кремний–полиимид (рис. 1), выполненных в виде сформированной в



**Рис. 1. Образец микроактюатора (а), схема принципа действия микроактюатора (б), схема балки (в) и упругошарнирного элемента балки микроактюатора (поперечное сечение канавки) (г):**

1 — рамка с мезаструктурой, 2 — балка, 3 — хвостовик, 4 — полиимид, 5 — кремний, 6 — подслой;  $b$  — эффективная толщина полиимида, влияющая на изгиб балки микроактюатора

мезаструктуре консольной балки, состоящей из параллельных трапециевидных вставок из монокристаллического кремния с ориентацией [100], соединенных прослойками, образованными полиимидной пленкой [3–6]. Чувствительный элемент теплового микроактюатора включает в себя рамку с мезаструктурой в монокристаллическом кремнии и термдеформируемую упругошарнирную слоистую консольно закрепленную в рамке балку, состоящую из трапециевидных плоских кремниевых элементов, (в том числе армированных модифицированными углеродными нанотрубками, адгезионно связывающими кремниевые элементы и образующими трапециевидные упругошарнирные узлы) и слоев металлизации различного назначения (рис. 1). Принцип действия теплового микроактюатора основан на термомеханическом эффекте при использовании в конструкции материалов с различными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР). Под действием температуры применяемые материалы расширяются по-разному, причем полиимид с большим ТКЛР деформируется больше, чем кремний с низким ТКЛР, что приводит к изменению угла деформации биморфной балки теплового микроактюатора (рис. 1, б). Таким образом, вследствие большого различия в ТКЛР полиимида и

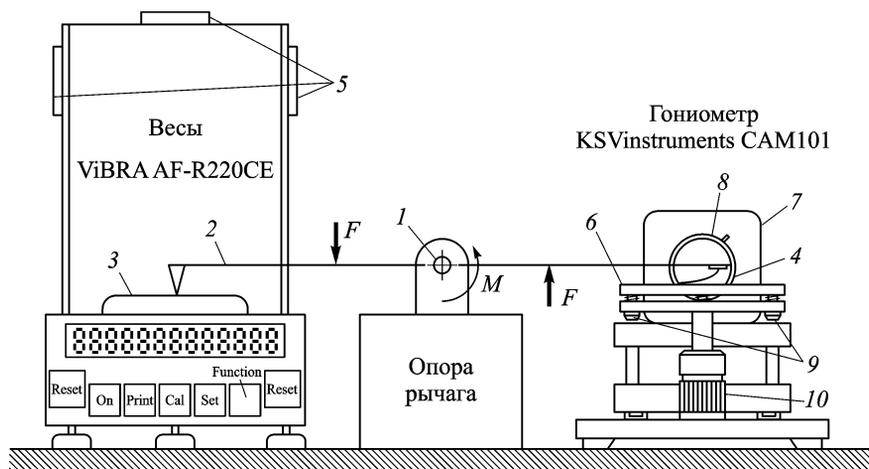
кремния угол начального изгиба упругошарнирной балки при нагревании уменьшается, а при охлаждении относительно начальной температуры увеличивается.

**Методика эксперимента.** При проведении эксперимента оцениваемыми характеристиками являлись: сила, возникающая на хвостовике балки теплового микроактюатора и угол деформации (поворота) балки теплового микроактюатора при различных ее положениях.

В основе методики измерения силовых характеристик тепловых микроактюаторов лежит применение цифровых высокоточных прецизионных весов, а также элементарной кинематической системы, связывающей образец теплового микроактюатора и предметный столик весов. Благодаря высокой точности измерительного инструмента — весов, возможно измерение очень малых нагрузок.

Для проведения испытаний были выбраны весы AF-R220CE фирмы ViBRA, применяемые в химических лабораториях и на производстве для взвешивания предметов небольшой массы (до 220 г). Схема установки приведена на рис. 2. На опоре, располагаемой рядом с весами, крепится металлическая ось 1. Ось закрепляется с возможностью вращения с минимальным трением (например, упираясь своими концами в магниты, расположенные на опоре). На оси располагается рычаг 2, один конец которого упирается напаянным острием в чашу весов 3, на другой давит хвостовик балки образца теплового микроактюатора 4.

Эксперимент проводится в последовательности, представленной в виде алгоритма (рис. 3). Образец теплового микроактюатора 4 (см. рис. 2) располагается на предметном столике 6 установки гониометра



**Рис. 2. Схема стенда для проведения измерений:**

1 — ось рычага; 2 — рычаг; 3 — чаша весов; 4 — образец теплового микроактюатора; 5 — колпак весов; 6 — предметный столик; 7 — видеочамера; 8 — кольцо фокусировки; 9, 10 — винты регулировки



**Рис. 3. Алгоритм проведения измерений силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов**

KSVinstruments CAM101 таким образом, чтобы хвостовик касался свободного конца рычага. При этом образец должен попадать в поле зрения высокоскоростной камеры 7 гониометра. Кольцом фокусировки 8 камеру настраивают на резкость. Винтами 9 для повышения точности измерений устанавливают горизонтальность предметного столика. При подъеме образца теплового микроактюатора с помощью регулятора 10 и давлении на свободный конец рычага весы показывают силу, с которой балка микроактюатора давит на чашу весов. Вместо пред-

метного столика на гониометре возможно применение термостолика, позволяющего измерять зависимость силовых характеристик микроактюатора от его температуры. Температура нагреваемого столика может задаваться в диапазоне от 293 до 583 К. При необходимости с помощью гониометра по методике, предложенной в работе [7], возможно измерение деформационных характеристик теплового микроактюатора.

Следует отметить, что чем длиннее рычаг, чем меньше трение в месте крепления оси рычага и точнее рычаг отцентрован по оси (т.е. левый и правый концы рычага не перевешивают друг друга), тем больше точность измерений силовых характеристик теплового микроактюатора.

Сопоставляя силовые и деформационные характеристики образца теплового микроактюатора при различных температурах, можно построить зависимость влияния угла поворота или температуры на нагрузку, возникающую на хвостовике балки теплового микроактюатора, и тем самым установить, какова максимально возможная нагрузка, воспринимаемая микроактюатором, и как на нее влияет температура. Точность проводимых измерений обуславливается точностью измерительных средств — гониометра ( $\pm 0,1^\circ$ ), цифрового термометра ( $\pm 1,5$  К), встроенного в термостолик, и высокоточных весов ( $\pm 0,3$  мг). Диапазон измеряемых нагрузок составляет от 0,1 мН до 2,15 Н.

Для экспериментов были выбраны образцы тепловых микроактюаторов с размером подвижной части  $12,15 \times 1,5 \times 0,18$  мм, имеющие в своей структуре от 30 до 50 параллельных трапециевидных вставок, образующих V-образные канавки, заполненные полиимидом. Серии экспериментов были направлены на исследование силовых характеристик микроактюаторов при различных технологических обработках, в том числе при напылении слоя металла и травлении кремния с нижней стороны микроактюатора. Один из экспериментов был направлен на изучение силовых характеристик микроактюатора в результате многоциклового изгиба подвижной балки. В этом эксперименте сравнивали образцы с внесенными в полимерную матрицу нанотрубками (использовались одностенные углеродные нанотрубки с концентрацией в полиимиде примерно  $11 \times 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>) и без них.

**Результаты.** На рис. 4 представлена типичная зависимость нагрузки, развиваемой балкой теплового микроактюатора, от угла деформации. Как следует из рисунка, зависимость носит линейный характер. При этом нагрузка обращается в нуль при угле деформации  $45^\circ$ . В ходе проведенных экспериментов было установлено, что максимальное значение нагрузки, развиваемой балкой теплового микроактюатора, составляет 5 мН для образца с размерами подвижной части  $12,15 \times 1,5 \times 0,18$  мм и числом канавок, равным 34.

Проведены испытания по определению зависимости силовых характеристик теплового микроактюатора от толщины напыленного сверху (со стороны полиимида) слоя Al. Результаты эксперимента приведены на рис. 5. Видно, что зависимость нагрузка–угол остается практически неизменной относительно первоначального угла отклонения, в абсолютном же значении нагрузка на хвостовике микроактюатора снижается с увеличением толщины слоя

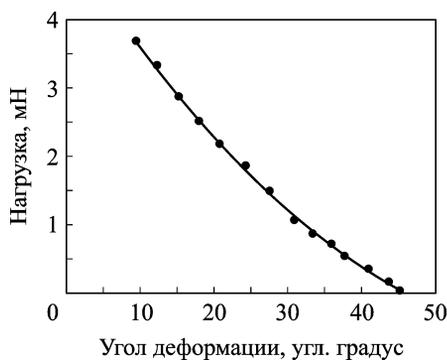


Рис. 4. Типовая силовая характеристика балок тепловых микроактюаторов

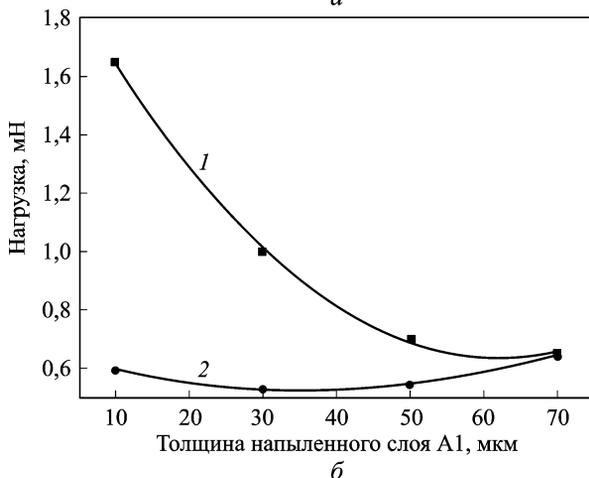
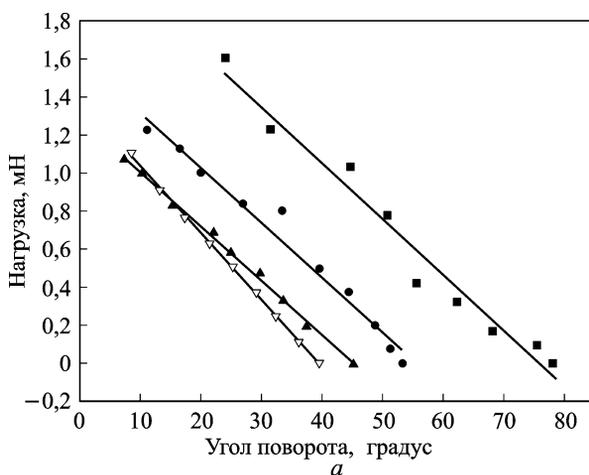
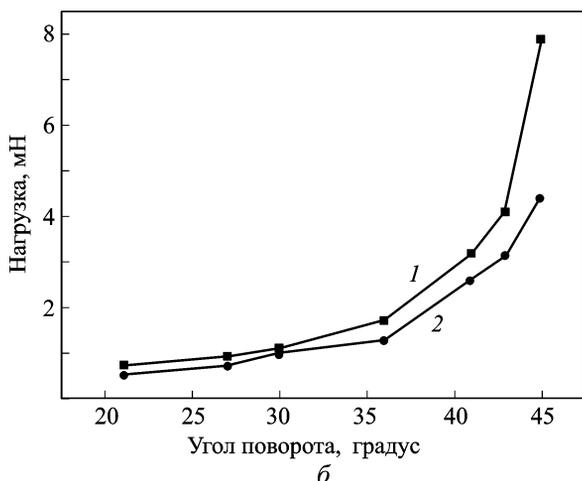
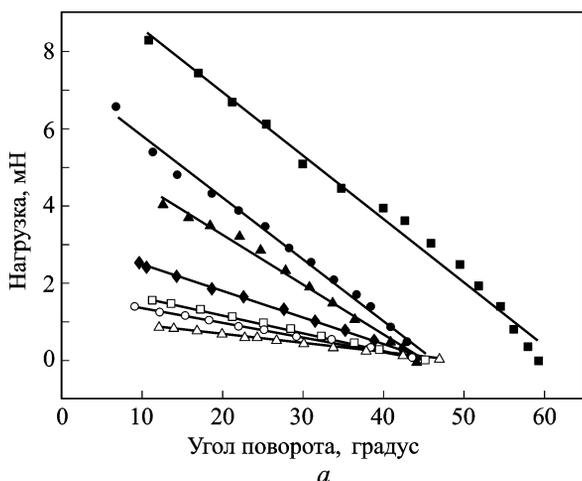


Рис. 5. Зависимость силовых характеристик балок микроактюаторов от угла отклонения подвижного элемента (а) и толщины напыленного слоя Al (б): ■ — 0,1 мкм; ● — 0,3 мкм; ▲ — 0,5 мкм; ▽ — 0,7 мкм; 1 и 2 — угол отклонения соответственно 20° и от 40° до 20°

Al, что вызвано уменьшением первоначального угла отклонения подвижного элемента. Таким образом, при напылении слоев Al толщиной до 0,7 мкм происходит уменьшение первоначального угла отклонения балки микроактюатора на 60%, что может быть вызвано увеличением жесткости конструкции.

На рис. 6 приведены результаты исследования влияния на силовые характеристики эффективной толщины  $b$  (см. рис. 1) полиимидного слоя в канавке после селективного плазмохимического травления кремния с обратной стороны микроактюатора. Следует отметить уменьшение значений нагрузок, вызванное уменьшением эффективной толщины  $b$  полиимида, приводящее к изменению геометрических



**Рис. 6. Зависимость силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов от угла отклонения подвижного элемента (а) и толщины рабочей части полиимида в канавке после травления кремния (б):**

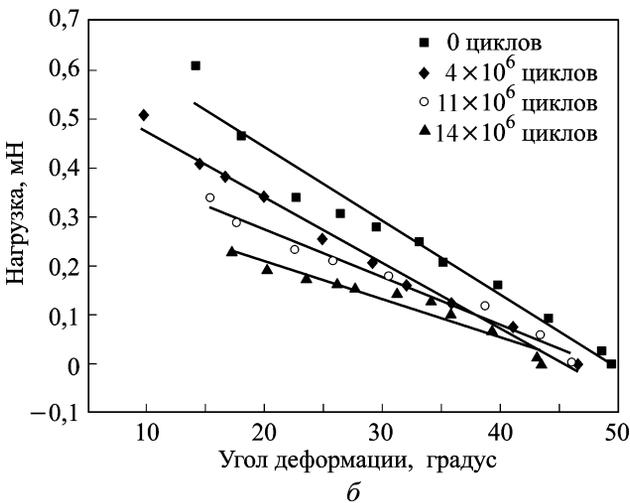
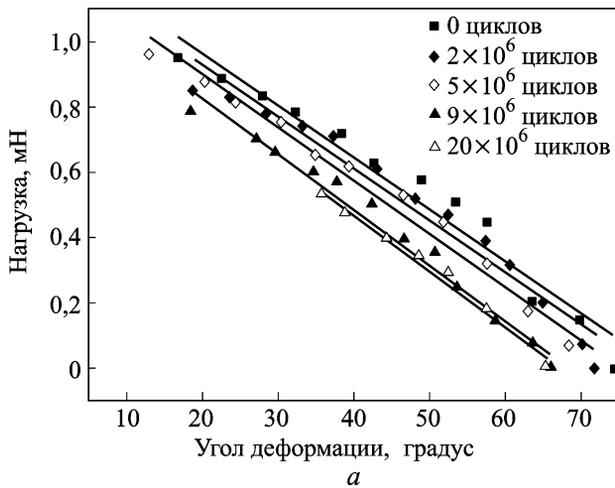
45 мкм — ■, 43 мкм — ●; 41 мкм — ▲; 36 мкм — ◆; 30 мкм — □; 27 мкм — ○; 21 мкм — △; 1 и 2 — угол отклонения соответственно 20° и от 40° до 20°

размеров упругошарнирных элементов, а следовательно, и упругих нагрузок, возникающих вследствие деформации полиимида. Таким образом, травление кремния с обратной стороны микроактюатора способствует экспоненциальному уменьшению нагрузки как в абсолютном значении (в 11 раз), так и относительно первоначального угла отклонения (в 9 раз). Исходный образец имел V-образную форму канавки (слой полиимида с обратной стороны закрыт кремнием), поэтому первоначальное (при первом травлении с эффективной толщиной полиимида с 45 до 43 мкм) резкое изменение нагрузки связано с качественным переходом упругошарнирного элемента от V-образной формы к трапецевидной в результате стравливания части кремния и открытия слоя полиимида с обратной стороны. Таким образом, операцию травления кремния с обратной стороны микроактюатора можно использовать как технологический способ, позволяющий регулировать нагрузку на балке микроактюатора.

Результаты эксперимента по исследованию силовых характеристик микроактюатора при многоцикловом изгибе подвижной балки приведены на рис. 7 и 8. Для 1-го образца, с нанотрубками (см. рис. 7, а, рис. 8, кривые 1, 2), силовые характеристики относительно первоначального угла отклонения практически не изменились (в пределах ошибки) после 20 миллионов циклов, а для 2-го образца, без нанотрубок (рис. 7, б, см. рис. 8, кривые 3, 4), максимальные нагрузки уменьшились в 2 раза относительно первоначального угла отклонения после 14 миллионов циклов [8]. Таким образом, нанотрубки повысили прочностные характеристики устройства и, как следствие, надежность характеристики и время наработки до отказа изделия. Из эксперимента следует целесообразность ввода в структуру микроактюатора нанотрубок.

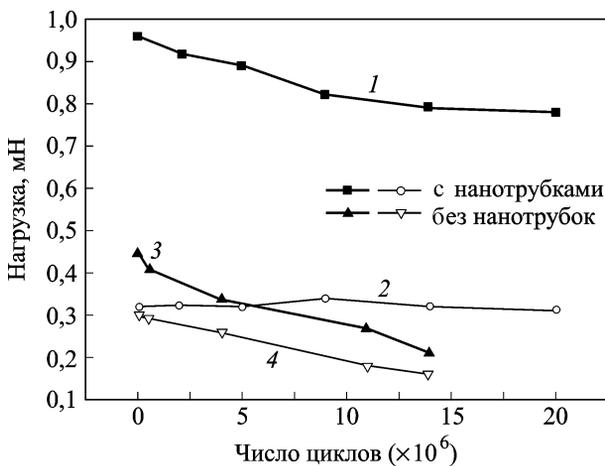
Проведенные испытания позволяют дополнить картину возможностей тепловых микроактюаторов, акцентируя внимание на высокой стабильности силовых характеристик подвижных балок, высоком уровне возникающих нагрузок и возможности изменения силовых характеристик микроактюаторов технологическими методами.

**Заключение.** Таким образом, предложена и реализована методика измерения силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов, подвергнутых воздействию контролируемой нагрузки. Проведены серии измерений силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов и экспериментально получены зависимости нагрузок, возникающих на хвостовике балки теплового микроактюатора, от угла деформации этой балки. Результаты позволяют судить о линейности силовой характеристики относительно угла перемещения балки теплового актюатора, а также показывают, что для исследуемого образца максимальное значение нагрузки составило 5 мН. Из экспериментов следует,



**Рис. 7. Зависимость силовых характеристик балок тепловых микроактюаторов при различном числе циклов изгиба от угла отклонения подвижного элемента микроактюатора с внесенными в структуру нанотрубками (а) и без нанотрубок (б)**

что травление кремния обуславливает экспоненциальное уменьшение нагрузки относительно первоначального угла отклонения в 9 раз, что позволяет рассматривать травление как один из способов регулирования нагрузки на балках тепловых актюаторов. Также эксперименты показали целесообразность ввода нанотрубок в структуру балок тепловых актюаторов в связи с повышением прочностных характеристик устройства и их стабильностью вплоть до 20 миллионов циклов изгиба балки микроактюатора. Полученные данные важны и необходимы для дальнейшего изучения устройства, дают возможность создания микроактюаторов с заранее заданными зависимостями нагрузок от углов поворота, позволяют расширить и более точно представлять область



**Рис. 8.** Значения нагрузки при угле отклонения в  $20^\circ$  (1, 3) и ее изменение при уменьшении угла отклонения от  $40^\circ$  до  $20^\circ$  (2, 4)

применения теплового микроактюатора и подтверждают тот факт, что именно биморфный тип микроактюаторов с V-образными канавками [1] имеет наибольшие значения нагрузок среди известных аналогов.

*Работа выполнена в рамках проектов Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.740.11.0080 от 1 сентября 2010 года) и РФФИ № 10-02-01336-офи\_а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gardner J., Varadan V., Awadelkarim O. Microsensors, MEMS and smart devices. – John Wiley@ Sons. Chichester. 2001. – 503 p.
- Springer Handbook of nanotechnology. 2nd Edition. Bharat Bhushan (Ed). – Springer. 2007. – 1916 p.
- Ebefors T. Polyimide V-groove joints for three-dimensional silicon transducers. PhD thesis. Royal Institute of Technolgy. Stockholm. 2000. – 144 p.
- Ebefors T., Kalvesten E., Stemme G. Dynamic actuation of polyimide v-grooves joints by electrical heating // Sensors and Actuators A. 1998. – Vol. 67. – P. 199–204.
- Жуков А. А., Корпухин А. С., Гринькин Е. А. Микросистемный биморфный привод устройств космической робототехники // Труды 19-й Всеросс. НТК Экстремальная робототехника. С-Пб. ГНЦ “Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК)”. 2008. – С. 126–127.
- Тимошенко С. П., Жуков А. А., Захаров А. А. Биморфный балочный актюатор с V-образными полиимидными канавками // Нано- и микро-системная техника. – 2007. – № 7. – С. 60–64.
- Жуков А. А., Корпухин А. С., Козлов Д. В., Смирнов И. П. Методика измерений деформационных характеристик микроактюаторов // Сб. стат. Второй Всерос. науч.-техн. конф. Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий. – М.: Радиотехника, 2010.

8. Оценка влияния многоциклового изгиба на термдеформационные характеристики упругошарнирных балок тепловых микроактюаторов / Козлов Д.В., Корпухин А.С., Смирнов И.П. Нано- и микросистемная техника. – 2011. – (в печати).

Статья поступила в редакцию 10.12.2010



Дмитрий Владимирович Козлов родился в 1986 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г. Инженер-исследователь ОАО “Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем”, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор одной научной работы. Специализируется в области микро- и нанoeлектроники, микроэлектромеханических систем, метрологии.

D.V. Kozlov (b. 1986) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009. Post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Engineer-researcher of JSC “Russian Corporation of Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems”. Author of publication in the field of micro- and nanoelectronics, microelectromechanical systems, metrology.



Игорь Петрович Смирнов родился в 1960 г., окончил Московский институт стали и сплавов в 1983 г. Начальник группы ОАО “Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем”. Автор одной научной работы. Специализируется в области микроэлектроники, технологии МЭМС.

I.P. Smirnov (b. 1960) graduated from the Moscow Institute of Steel and Alloys in 1983. Head of group of JSC “Russian Corporation of Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems”. Author of 1 publication in the field of microelectronics and technology of microelectromechanical systems.



Андрей Александрович Жуков родился в 1961 г., окончил Московский авиационно-технологический институт в 1984 г. Д-р техн. наук, доцент, начальник отдела ОАО “Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем”. Автор 62 научных работ в области микроэлектроники, нанoeлектроники, технологии МЭМС.

A.A. Zhukov (b. 1961) graduated from the Moscow Aviation and Technological Institute in 1984. D. Sci. (Eng.), assoc. professor, head of department of JSC “Russian Corporation of Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems”. Author of 62 publications in the field of microelectronics, nanoelectronics and technology of microelectromechanical systems.



Вадим Анатольевич Шахнов родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, заведующий кафедрой МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 186 научных работ в области микро- и нанoeлектроники, радиоэлектроники, технологии производства ЭВМ, микропроцессорных средств и систем, надежности электронной аппаратуры.

V.A. Shakhnov (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. D. Sc. (Eng.), professor, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, head of department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 186 publications in the field of micro- and nanoelectronics, radio-electronics, technology of computer manufacturing, microprocessor aids and systems, reliability of electronic apparatus.