

Распределение температуры по длине термомеханического актюатора

*С.П. Тимошенко, В.К. Самойликов, С.С. Евстафьев,
А.М. Терещенко, И.М. Бритков*

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Temperature Distribution along Length of Thermomechanical Actuator

*S.P.Timoshenkov, V.K.Samoylikov, S.S.Evstafev,
A.M.Tereshchenko, I.M.Britkov*

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Представлены результаты разработки и исследования характеристик микрозеркального элемента, приводимого в движение тепловыми микроактюаторами. Показано, что для расчета стрелы прогиба микрозеркального элемента необходимо учитывать распределение температуры перегрева по длине элемента. Выполнен расчет температуры перегрева, определена эффективная температура перегрева и проведено сравнение полученных значений с экспериментальными данными.

Ключевые слова: микрозеркальный элемент; тепловой микроактюатор.

The results of investigation and development of the characteristics of the micromirror element, driven by a thermal microactuator, have been presented. It has been shown that for calculating the micromirror element deflection it is crucial to take into consideration the temperature distribution along the element length. The superheat temperature calculation has been executed, the effective superheat temperature has been determined, as well as the comparison with the experimental data has been performed.

Keywords: micromirror element; thermal microactuator.

Введение. Технология микроэлектроники, в частности технология объемной и поверхностной микрообработки поверхностей, постоянно совершенствуется, что дает возможность создавать новые классы систем, объединяющих в себе электрические схемы, механические и оптические компоненты. Такие системы получили название микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС). Они имеют преимущества как микроэлектронных изделий, а именно возможность группового изготовления, малые размеры, высокую надежность, так и оптических устройств. Сфера применений МОЭМС обширна и включает в себя оптические переключатели [1], микропроекторные системы (так называемые пикопроекторы) для портативных электронных устройств [2], оптические сканеры [3], эндоскопы [4], системы управления полупроводниковыми лазерами [5],

системы адаптивной оптики [6] и прочее. Ключевым компонентом МОЭМС является микромеханическое зеркало, представляющее собой отражающий элемент, установленный на подвижном подвесе. Микромеханические зеркала могут приводиться в движение с помощью актюаторов, построенных на различных физических воздействиях (электростатических, термомеханических, пьезоэлектрических или электромагнитных). Каждый тип актюатора имеет и достоинства, и недостатки, поэтому его тип следует выбирать под конкретную задачу МОЭМС.

В ходе решения задач по созданию массива микромеханических зеркал с большим углом поворота реализован прототип матрицы микромеханических зеркал [7], которая представляет собой кремниевый кристалл, установленный на печатной плате, содержащей элементы системы управления (рис.1,а). На кристалле с помощью комплекса технологических операций создан массив из 10 000 микромеханических зеркал, имеющих размер отражающей поверхности 100×100 мкм (рис.1,б). Зеркала способны изменять свое положение относительно плоскости поверхности кристалла под воздействием управляющего сигнала. При завершении комплекса технологических операций по изготовлению микрозеркального элемента происходит его изначальный подъем и изгиб со стрелой прогиба h .

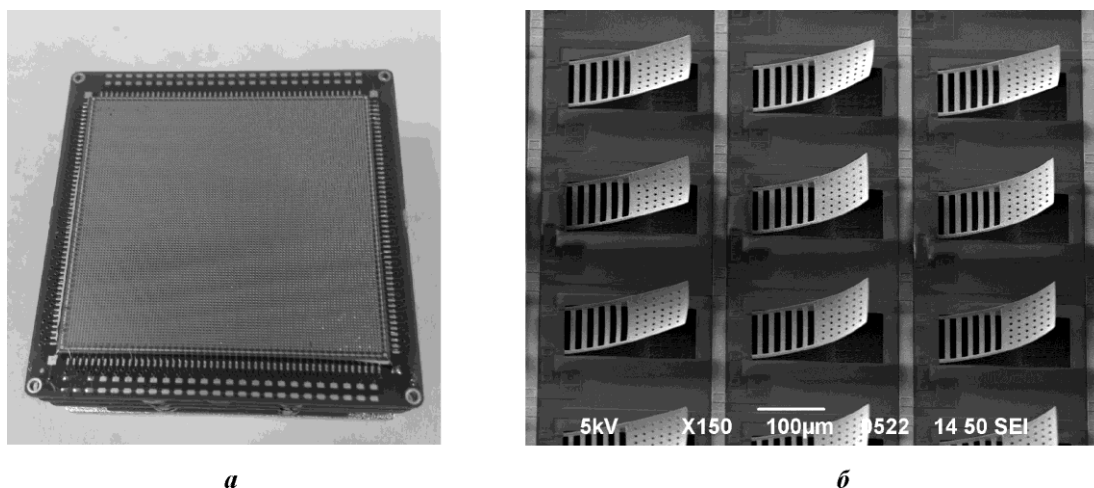


Рис.1. Прототип матрицы микромеханических зеркал: а – внешний вид; б – фрагмент участка поверхности

Каждое микромеханическое зеркало представляет собой отражательный элемент с покрытием из алюминия, приводимый в движение с помощью двух биморфных балок из алюминия и диоксида кремния – тепловых микроактюаторов (рис.2).

Определение подъема микрозеркала. На основании формул, приведенных в [7], проведен расчет стрелы прогиба опытного образца микрозеркального элемента размером 100×100 мкм (см. рис.2) при постоянной комнатной температуре $t_0=20$ °С. Расчет выполнен при следующих условиях: $E_1 = E_2 = 7 \cdot 10^{10}$ Па; $b_1 = b_2 = 7 \cdot 10^{-6}$ м; $\delta_1 = 0,8 \cdot 10^{-6}$ м; $\delta_2 = 1,1 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha_1 = 5 \cdot 10^{-7}$; $\alpha_2 = 2,25 \cdot 10^{-5}$.

Следует подчеркнуть, что в формуле расчета радиуса искривления под Δt понимается разница между температурой среды и температурой, при которой балка находится параллельно пластине (температура релаксации). Температура релаксации в данном случае определяется технологическим процессом, в частности операцией вжигания, оптимизирующей свойства контактов «алюминий–кремний». Данная операция проводи-

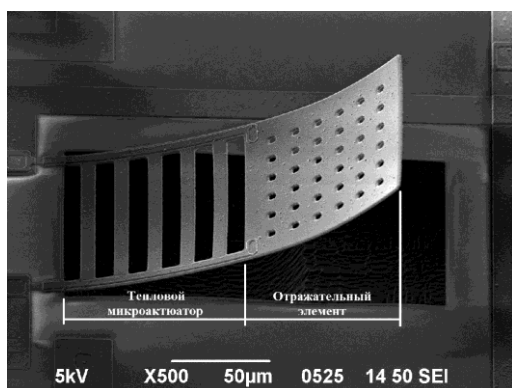


Рис.2. Опытный образец микрозеркального элемента

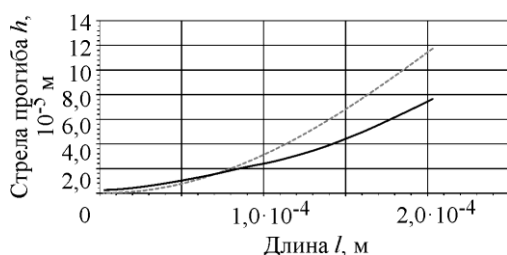


Рис.3. Профиль микрозеркального элемента при $t = 20$ °С: --- расчет; — эксперимент

лась при температуре 440 °С. Таким образом, при $t_0 = 20$ °С температура перегрева составляет 420 °С и стрела прогиба близка к значению $1,2 \cdot 10^{-4}$ м.

При тестировании микрозеркального элемента, проведенном при указанных условиях, получено значение стрелы прогиба, равное $0,76 \cdot 10^{-4}$ м. На рис.3 представлены результаты расчета и тестирования стрелы прогиба микрозеркального элемента.

Из рис.3 видно значительное отклонение результатов расчета стрелы прогиба от результатов эксперимента. Это можно объяснить некорректностью предположения независимости величины перегрева от места локализации точки актюатора. Следовательно, возникает необходимость использовать модель, учитывающую изменение температуры по длине микрозеркального элемента.

Расчет распределения температуры по длине микрозеркального элемента. На рис.4 представлена расчетная схема микрозеркального элемента.

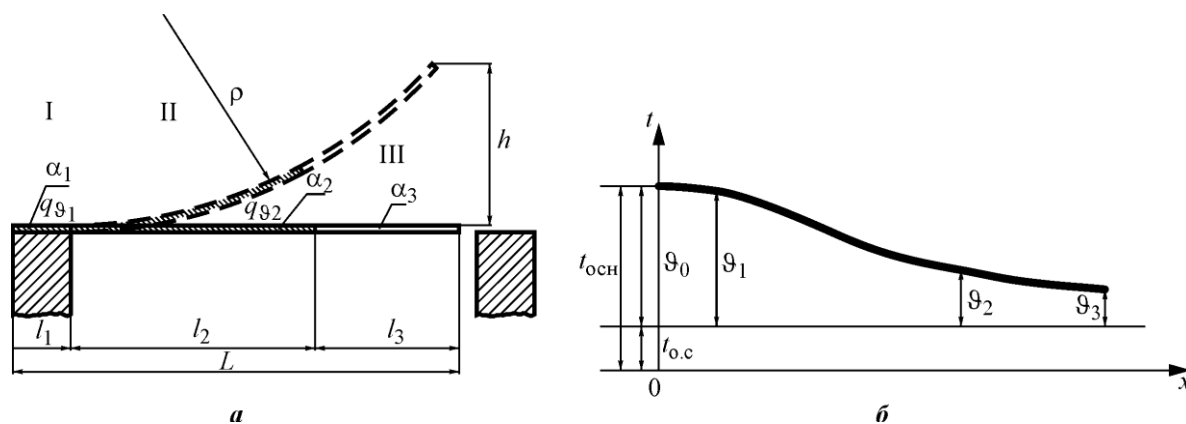


Рис.4. Расчетная схема микрозеркального элемента: а – зоны микрозеркального элемента; б – значения перегрева на этих зонах

Микрозеркальный элемент можно разделить на активную зону, которая содержит поликремниевый нагреватель и пассивную (зеркальную) зону без нагревателя. В свою очередь, активная зона состоит из контактного участка I и консольного участка II. Пассивная зона актюатора образует участок III.

При расчете распределения температуры по длине микрозеркального элемента приняты следующие допущения: элемент находится в среде с постоянной температурой t_0 ; коэффициенты теплоотдачи (в пределах каждой из зон элемента) в окружающую среду считаются постоянными; площадь поперечного сечения актюатора f мала по

сравнению с его длиной L . Это дает основание пренебречь изменением температуры в поперечном сечении и считать, что ее изменение происходит только вдоль оси x .

Обозначим температуру перегрева актюатора как

$$\vartheta = t - t_0,$$

где t – текущее значение температуры балки.

Уравнение теплового баланса для элемента балки длиной dx с учетом действия равномерно распределенных внутренних источников тепловыделения нагревателя [8] имеет вид

$$dQ = \left(\lambda_i f_i \frac{d^2 \vartheta(x)}{dx^2} + q_{\vartheta} f \right) dx. \quad (1)$$

В соответствии с законом Ньютона – Рихмана количество тепла, теряемое в единицу времени с поверхности ds балки, равно:

$$dQ = \alpha_i P_i \vartheta dx. \quad (2)$$

Приравняв уравнения (1) и (2) и преобразовав их, получим основное уравнение, характеризующее изменение температурного поля балки термомеханического актюатора:

$$\frac{d^2 \vartheta(x)}{dx^2} = m^2 \vartheta(x) - \frac{q_{\vartheta}}{\lambda_1}. \quad (3)$$

Здесь $q_{\vartheta} = U^2 \left(\frac{1}{R_I} + \frac{1}{R_{II}} \right) / f(l_I + l_{II})$ – производительность внутренних источников тепловыделения, Вт/м³; U – напряжение, подаваемое на активные элементы сопротивлением R_I и R_{II} ; $l_I + l_{II}$ – длины I и II участков (активной зоны балки) соответственно;

$m_1 = \sqrt{\frac{\alpha_1 P_1}{\lambda_1 f_1}}$ – параметр, учитывающий условия теплообмена, геометрические и теплофизические характеристики зеркального микроактюатора, м⁻¹; $\alpha_1, \lambda_1, P_1, f_1$ – приведенные коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности, периметр и площадь поперечного сечения балки микроактюатора соответственно.

Уравнения (3) решаются при следующих граничных условиях.

На участке I, где $0 \leq x \leq l_1$, при $x = 0$ $\left. \frac{d\vartheta_1}{dx} \right|_{x=0} = 0$,

$$\vartheta_1(x) = c_1 \cosh(m_1 x) + \frac{q_{\vartheta}}{\lambda_1 m_1^2}. \quad (4)$$

На участке II, где $l_1 \leq x \leq l_2$, при $x = l_1$, $\vartheta_1 = \vartheta_2$ $\left. \frac{d\vartheta_1}{dx} \right|_{x=l_1} = \left. \frac{d\vartheta_2}{dx} \right|_{x=l_2}$,

$$\vartheta_2(x) = d_1 \cosh(m_2 x) + d_2 \sinh(m_2 x) + \frac{q_{\vartheta}}{\lambda_2 m_2^2}. \quad (5)$$

На участке III, где $l_2 \leq x \leq l_3$, при $x = l_3$, $\vartheta_2 = \vartheta_3$, $\left. \frac{d\vartheta_2}{dx} \right|_{x=l_2} = \left. \frac{d\vartheta_3}{dx} \right|_{x=l_3}$,

$$\vartheta_3(x) = b_1 \cosh(m_3 x) + b_2 \sinh(m_3 x). \quad (6)$$

При $x = L$ количество тепла, подводимого к торцу балки за счет теплопроводности, равно количеству тепла, теряемого поверхностью торца в окружающую среду за счет теплоотдачи:

$$\left. \frac{d\vartheta_3}{dx} \right|_{x=L} = -\frac{\alpha_L}{\lambda_3} \vartheta_L.$$

Как правило, $\frac{\alpha_L}{\lambda_3} \rightarrow 0$ и теплоотдачей с торца балки можно пренебречь. В этих условиях

$$\vartheta_L = \frac{\vartheta_2}{\cosh(m_3 L)}.$$

Неизвестными в уравнениях (4)–(6) являются значения коэффициентов: d_1 , d_2 , c_1 , b_1 , b_2 . Для определения этих коэффициентов используется метод Гаусса [9].

Поскольку актюатор представляет собой многослойную структуру из материалов с различными физическими свойствами, при вычислении параметра m_1 использовались значения эффективных и приведенных коэффициентов.

Потери тепла в контактной зоне актюатора (участок I) происходят за счет теплопроводности через основание (многослойная структура) и конвекции от открытых верхних частей активной структуры актюатора. Потери тепла в консольной зоне актюатора (участки II и III) происходят только за счет конвекции.

Приведенный коэффициент теплоотдачи через основание (участок I) определяется по формуле

$$\alpha_{\text{пр.осн.I}} = \frac{\lambda_{\text{эфф.осн}}}{\sum_1 \Delta_i}.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности определяется как

$$\frac{1}{\lambda_{\text{эфф.i}}} = \sum_1 \frac{\Delta_i}{\lambda_i} / \sum_1 \Delta_i,$$

где λ_i и Δ_i – коэффициент теплопроводности и толщина слоя составляющих композитной структуры соответственно.

Приведенный коэффициент теплоотдачи от открытых (верхних) частей основания (участок I) рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\text{пр.откр.I}} = \frac{\alpha_I s_{\text{конт.I}} + \alpha_{II} s_{II} + \alpha_{III} s_{III} + \alpha_{3.э} (S_{3.э} s_{\text{конт.I}} s_{II} s_{III})}{S_{3.э}},$$

где α_I , α_{II} , α_{III} – коэффициенты теплоотдачи соответствующих участков активной структуры, Вт/(м²·град); $s_{\text{конт.I}}$, s_{II} , s_{III} , $S_{3.э}$ – поверхности теплообмена контактной части участков I, II и III и пассивной (без нагревательных элементов) части поверхности зеркального элемента, м².

Коэффициенты теплоотдачи α_1 , α_{II} , α_{III} участков активной структуры определяются по формуле [10]

$$Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda} = 1,18(Gr \cdot Pr)^{1/8}.$$

Здесь $d_3 = \frac{4f}{P}$ – эквивалентный диаметр активной структуры с площадью поперечного сечения f и периметром P ; λ – коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт/(м·град); $Gr = \frac{g\beta(t_{a.c} \cdot t_{o.c})d_3^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения, 1/К; $t_{a.c}$ – температура активной структуры; $t_{o.c}$ – температура окружающей среды; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ – коэффициент температуропроводности, м²/с; ρ и c_p – соответственно плотность и удельная теплоемкость окружающей среды.

В условиях, когда $d_3 \rightarrow 0$, толщина пограничного слоя значительно превосходит величину d_3 (пленочный режим), теплоотдача определяется режимом теплопроводности, при котором

$$Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda} \rightarrow 0,5.$$

Расчеты выполнены при значениях параметров, приведенных в таблице.

Значения параметров для расчета перегрева

Параметр	Зоны актюатора		
	Активная		Пассивная
	контактная	нагревателя	
Длина l_i , мкм	3,2	100	100
Периметр P_i , мкм	914	18,6	175
Площадь поперечного сечения f_i , мкм ²	3150	16,1	64
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	2,1	3,3	2,6
Диаметр эквивалентный d_3 , мкм	13,8	3,5	4,2
Коэффициент теплоотдачи α_i , Вт/м ² ·К	4400	4400	4400
Параметр m_i , м ⁻¹	$2,46 \cdot 10^4$	$3,15 \cdot 10^4$	$3,92 \cdot 10^4$
Выделяемая электрическая мощность $N_{эл,i}$, мВт	–	6,2	–
Мощность тепловых потерь Q_i , мВт	0,2	3,2	2,8

На рис.5,а приведены результаты расчета температуры перегрева ϑ актюатора по его длине. Получена эффективная температура перегрева $\vartheta_{эфф}=140,16$ °С.

Метод расчета стрелы прогиба при неравномерном распределении температуры по длине элемента показывает более высокую точность по сравнению с методом, при котором температура считалась распределенной равномерно (рис.5,б). Предложенный метод можно применять для теоретического расчета угла отклонения балки актюатора.

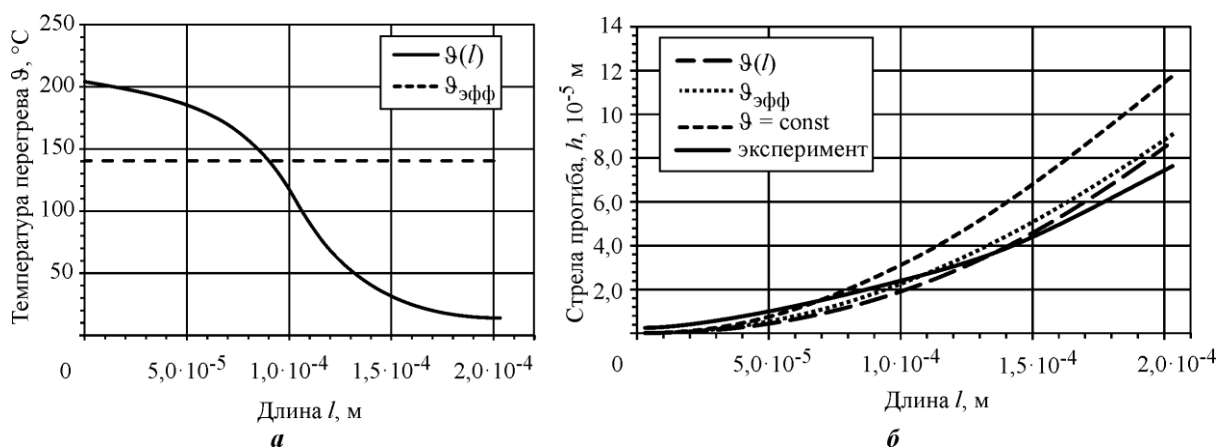


Рис.5. Изменение температуры перегрева Θ по длине балки (а) и сравнение расчетов профиля микрозеркального элемента, полученных различными методами (б)

Заключение. Для расчета стрелы прогиба микрозеркального элемента, построенного на базе теплового микроактюатора, необходимо учитывать неравномерность распределения температуры перегрева по длине актюатора. Расчет позволяет установить распределение температуры перегрева по длине микроэлемента, а также определить эффективную температуру перегрева. Разница между значениями стрелы прогиба, полученными при $\Theta_{эфф}$ и $\Theta(l)$, составляет 3,82%.

Определен профиль микрозеркального элемента и установлено значение стрелы прогиба: высота подъема, вычисленная по фотографии со сканирующего электронного микроскопа, составляет 79,1 мкм. Это на 9,4% меньше, чем при теоретическом расчете.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57514X0069).

Литература

1. Design and preliminary implementation of an N×N diffractive all-optical fiber optic switch / **B. Lynn, Blanche, Miles P.-A., Wissinger A. et al.** // Lightwave Technology. – 2013. – Dec. 15. – Vol. 31. – N. 24. – P. 4016–4021.
2. **Li Li, Ran Li, Lubeigt W., Uttamchandani D.** Design, simulation, and characterization of a bimorph varifocal micromirror and its application in an optical imaging system // Microelectromechanical Systems J. – 2013. – April. – Vol. 22. – N. 2. – P. 285–294.
3. **Sasaki T., Hane K.** Varifocal micromirror integrated with comb-drive scanner on silicon-on-insulator wafer // Microelectromechanical Systems. – 2012. – Aug. – Vol. 21. – N. 4. – P. 971–980.
4. A large rotational angle micromirror based on hypocycloidal electrothermal actuators for endoscopic imaging / **Mu Xiaojing, Xu Yingshun, J.Singh et al.** // Optical MEMS and Nanophotonics (OPT MEMS), 2010 International Conference on. – (9–12 Aug. 2010). – 2010. – P. 23, 24.
5. Output characteristics of Q-switched solid-state lasers using intracavity MEMS micromirrors / **R. Bauer, A. Paterson, C. Clark et al.** // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2015. – Jan. – Feb. – Vol. 21. – N. 1. – P. 1–8.
6. Drift-free micromirror arrays made of monocrystalline silicon for adaptive optics applications / **M. Lapisa, F. Zimmer, G. Stemme et al.** // Microelectromechanical Systems. – 2012. – Aug. – Vol. 21. – N. 4. – P. 959–970.
7. Расчет и экспериментальное исследование температурной зависимости угла отклонения элемента микрозеркала // **С.П. Тимошенко, С.С. Евстафьев, И.М. Бритков и др.** // Изв. вузов. Электроника. – 2014. – № 3 (107). – С. 43–49.
8. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия. – 1975. – 488 с.

9. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра: учеб. для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 280 с.
10. Физическая энциклопедия: в 5 т. Т. 3. – М.: Большая российская энциклопедия, 1992. – С. 369.

Статья поступила
3 марта 2015 г.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* разработка конструкций и технологий изготовления малогабаритных преобразователей линейного ускорения (микроакселерометров), угловой скорости (микрогироскопов), инклинометров, микроповоротных зеркал, систем позиционирования и элементов навигационных блоков, блоков инерциальной информации на основе кремниевых чувствительных элементов. **E-mail:** spt@miee.ru

Самойликов Вячеслав Константинович – доктор технических наук, профессор кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* теория и практика теплообмена в технологических процессах и оборудовании, теплообмен в элементах и устройствах микросистемотехники, термоэлектрические преобразователи и генераторы, гидрогазодинамика в плазмохимических процессах и оборудовании.

Евстафьев Сергей Сергеевич – инженер кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* тепловые микроактюаторы, микрозеркальные оптические системы.

Терещенко Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики №2 МИЭТ. *Область научных интересов:* гидродинамическая устойчивость, численные методы моделирования.

Бритков Игорь Михайлович – инженер кафедры микроэлектроники МИЭТ. *Область научных интересов:* электростатические двигатели, микрозеркальные оптические системы, робототехнические системы.

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Оформить годовую подписку на электронную
копию журнала можно на сайтах

- **Научной электронной библиотеки:** www.elibrary.ru
- **Национального цифрового ресурса «Рукопт»:** www.rucont.ru