

**Раздел III. Нанотехнологии и материаловедение**

УДК 621.382:669.691.5

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-171-178

**С.В. Малохатко, Е.Ю. Гусев, О.А. Агеев****РАЗРАБОТКА СТРЕЛОВИДНОГО КАНТИЛЕВЕРА ДЛЯ  
МНОГОЧАСТОТНОЙ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

*В настоящее время в электронике ученые стараются перейти от микроуровня к нано. С развитием такого направления, как нанoeлектроника требуются усовершенствованные методы изучения поверхностей материалов. Многочастотная атомно-силовая микроскопия включает несколько методов силовой микроскопии, которые позволяют сократить время сбора данных, повысить пространственное разрешение и количественное картирование свойств поверхности. Для получения требуемых резонансных частот кантилевера используется метод распределения масс. В связи с этим используются специализированные кантилеверы, которые получают путем модификации стандартных форм балок (с вытравленным пазом; с утонением под форму стрелы). Для изготовления специализированных кантилеверов используют коммерческие кантилеверы из монокристаллического кремния. В качестве материалов помимо привычного кремния, также используются нитрид кремния и поликристаллический кремний. Применение поликристаллического кремния позволяет повысить прочность кантилевера. Целью данной работы является разработка конструкции стреловидного кантилевера из поликристаллического кремния для многочастотной атомно-силовой микроскопии. В работе реализована параметрическая модель кантилевера на основе поликристаллического кремния специализированного для многочастотной атомно-силовой микроскопии, позволяющая исследовать частотные характеристики и отклонение кантилевера. Представлены результаты численного моделирования первых трех резонансных частот методом конечных элементов. Моделирование выполнено при условии, что геометрические параметры балки лежали в диапазонах: длина 150–200 мкм, толщина от 2–6 мкм, ширина 20–50 мкм; размеры острия и его положение не менялись: высота острия 15 мкм, радиус основания 2 мкм и радиус вершины 35 нм. На основе разработанной модели определены диапазоны наиболее оптимальных значений для первых трех резонансных частот кантилевера,  $f_1$  – 50-250 кГц,  $f_2$  – 400-1500 кГц,  $f_3$  – 700 – 1900 кГц. Также получены аналитические зависимости коэффициента жесткости от геометрических параметров (длины, толщины, ширины): от 3,0 до 1,25 Н/м; 1,4 до 3,4 Н/м и от 2 до 50 Н/м; соответственно. Полученные данные позволили определить конструкцию стреловидного кантилевера с геометрическими параметрами, обеспечивающими оптимальное соотношение жесткости и резонансной частоты, удовлетворяющие требованиям многочастотной атомно-силовой микроскопии (длина 170 мкм, ширина 30 мкм и толщина 2 мкм).*

*Многочастотная атомно-силовая микроскопия; стреловидная форма балки; поликристаллический кремний; резонансная частота; коэффициент жесткости.*

**S.V. Malohatko, E.Yu. Gusev, O.A. Ageev****DEVELOPMENT OF THE SWEEPED CANTILEVER  
FOR MULTIFREQUENCY ATOMIC FORCE MICROSCOPY**

*Currently, in electronics, scientists are trying to move from micro to nano. With the development of such a direction as nanoelectronics, an improvement of methods for studying the surfaces of materials is required. Multifrequency atomic force microscopy includes several methods of force microscopy, which can reduce the time of data collection, improve spatial resolution and quantitative mapping of surface properties. To obtain the required resonant frequencies of the*

cantilever, a mass distribution method is used. In this regard, specialized cantilevers are used, which are obtained by modifying the standard forms of beams (with etched groove; with drowning under the shape of an arrow). For the manufacture of specialized cantilevers use commercial cantilevers of monocrystalline silicon. In addition to the usual silicon, silicon nitride and polycrystalline silicon are also used as materials. The use of polycrystalline silicon increases the strength of the cantilever. The purpose of this work is to develop a design of a swept cantilever made of polycrystalline silicon for multifrequency atomic force microscopy. The work implemented a parametric model of the cantilever on the basis of polycrystalline silicon specialized for multifrequency atomic force microscopy to investigate the frequency characteristics and the deviation of the cantilever. The results of numerical simulation of the first three resonant frequencies by the finite element method are presented. The simulation is performed under the condition that the geometrical parameters of the beam lying in the range: length 150–200  $\mu\text{m}$ , thickness from 2–6  $\mu\text{m}$ , width of 20 to 50  $\mu\text{m}$ ; the dimensions of the tip and its position has not changed: the height of the tip 15  $\mu\text{m}$ , and a base radius of 2 microns and the corner radius of 35 nm. On the basis of the developed model, the ranges of the most optimal values for the first three resonant frequencies of the cantilever,  $f_1$ –50–250 kHz,  $f_2$ –400–1500 kHz,  $f_3$ –700–1900 kHz were determined. Analytical dependences of stiffness coefficient on geometrical parameters (length, thickness, width) from 3.0 to 1.25 N/m are also obtained; 1.4 to 3.4 N/m and 2 to 50 N/m; respectively. The data obtained made it possible to determine the design of a swept cantilever with geometric parameters that provide an optimal ratio of stiffness and resonance frequency that meet the requirements of multifrequency atomic force microscopy (length 170  $\mu\text{m}$ , width 30  $\mu\text{m}$  and thickness 2  $\mu\text{m}$ ).

*Multi-frequency atomic force microscopy; swept beam shape; polycrystalline silicon; resonant frequency; stiffness coefficient.*

**Введение.** С появлением таких направлений, как наноэлектроника и биомедицина, возникла необходимость в изучении поверхностей различных материалов. Наиболее широкое распространение при этом получила атомно-силовая микроскопия (АСМ). Помимо стандартных режимов работы АСМ в настоящее время стали использовать многочастотную методику [1–3]. Многочастотная АСМ основана на измерениях на нескольких частотах, совпадающих с гармониками собственной частоты (рис. 1) [4–13]. Данная особенность обуславливает получение более высокого пространственного разрешения, сокращение времени анализа, а также позволяет расширить возможности количественного картирования свойств поверхности и спектр исследуемых материалов различной твердости (в т.ч. опухоли, клетки, полимеры и биопленки) [1–4].

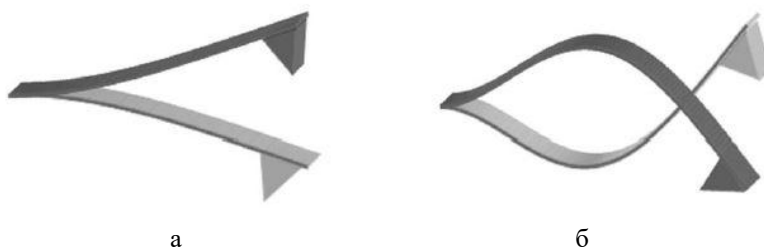


Рис. 1. Отклонение кантилевера: а – в динамическом режиме АСМ, б – многочастотного АСМ

Для получения высокого гармонического отклика необходимо чтобы более высокая резонансная частота собственных мод была кратной первой резонансной частоте. Большинство промышленных кантилеверов не предназначены для многочастотной АСМ, так как их резонансные частоты собственных мод не совпадают ни с одной гармоникой резонансной частоты. В связи с этим их модернизируют путем интеграции пьезоэлектрических приводов [8, 9] или изменения распределения массы (добавление, удаление) вдоль кантилевера, например, балки с вытрав-

ленным пазом, балки стреловидной формы [14–24]. Основным преимуществом стреловидной формы перед пазом является возможность сохранения прочности конструкции. Для изготовления специализированных кантилеверов в основном используют промышленные кантилеверы из монокристаллического кремния. В качестве альтернативных материалов рассматриваются нитрид кремния и поликристаллический кремний. Отмечается, что применение последнего позволит повысить прочность кантилевера [25].

Цель работы заключается в разработке конструкции стреловидного кантилевера на основе поликристаллического кремния удовлетворяющей требованию кратности частот для применения в многочастотной атомно-силовой микроскопии.

**Методика моделирования.** Конструкция кантилевера состоит из стандартного основания и балки стреловидной формы, на свободном конце которой расположено острие (рис. 2).

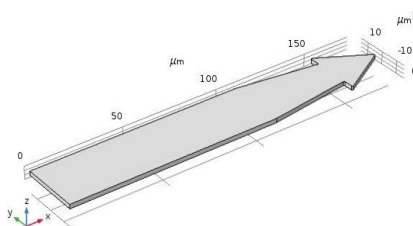


Рис. 2. Трехмерная модель стреловидного кантилевера

При проведении моделирования методом конечных элементов варьировались геометрические параметры балки. При этом высота и основание равнобедренного треугольного окончания менялись параметрически в зависимости от ширины балки (табл. 1). Параметры острия принимались постоянными: радиус основания – 2 мкм, радиус вершины – 35 нм, высота – 15 мкм.

Таблица 1

**Параметры модели**

Параметр	Значение
Длина консольной балки, мкм	150–200
Ширина консольной балки, мкм	20–50
Толщина консольной балки, мкм	2–6
Сторона треугольника, мкм	20–50

Параметры поликристаллического кремния, которые учитывались при моделировании, приведены в табл. 2 [26].

Таблица 2

**Свойства поликристаллического кремния**

Свойства	Значения
Модуль Юнга, ГПа	169
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2100
Коэффициент Пуассона	0,22

При проведении аналитических расчетов коэффициента жесткости использовали приближение «прямоугольной балки с массой на конце» [26]. С учетом отличия реальной формы балки (наличие треугольного окончания) от прямоугольной для определения коэффициента жесткости окончательно получим:

$$k = \frac{E}{4} w \left( \frac{t}{l} \right)^3, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент жесткости,  $E$  – модуль Юнга,  $w$  – ширина балки,  $t$  – толщина балки,  $l$  – длина балки.

**Результаты исследования.** На основе реализованной параметрической модели стреловидного кантилевера были получены зависимости первых трех резонансных частот от его геометрических параметров (рис. 3–5).

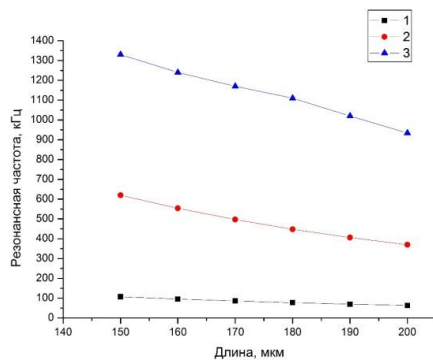


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты от длины балки

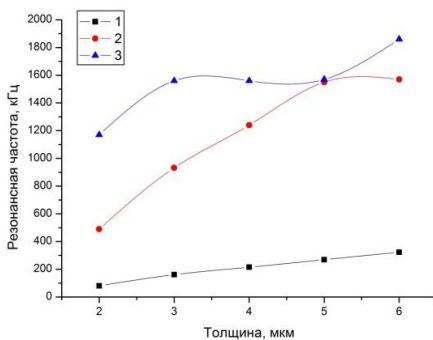


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от толщины балки

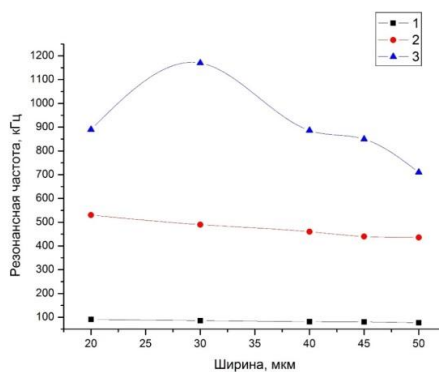


Рис. 5. Зависимость отклонения от ширины балки

Как видно из приведенных зависимостей значения резонансных частот кантилевера уменьшаются с увеличением (уменьшением) длины (толщины), что связано с изменением коэффициента жесткости и перераспределением массы балки [11]. Дальнейшее увеличение длины (более 200 мкм) приведет к снижению коэффициента жесткости и резонансной частоты, как показано ранее [10], в связи с чем возможно появление шумов, оказывающих негативное воздействие на качество получаемых изображений.

Далее были рассчитаны значения коэффициента жесткости согласно выражению (1) (рис. 6).

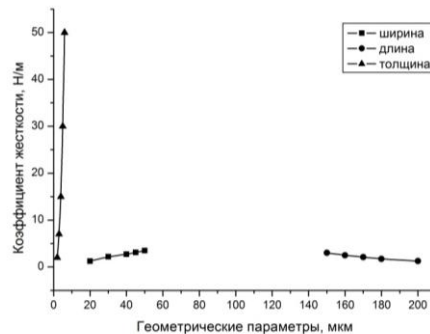


Рис. 6. Зависимость коэффициента жесткости от геометрических параметров кантилевера

Изменение коэффициента жесткости в зависимости от длины, толщины, ширины балки составило: от 3,0 до 1,25 Н/м; 1,4 до 3,4 Н/м и от 2 до 50 Н/м, соответственно.

Резонансная частота кантилевера и коэффициент жесткости являются одними из наиболее важных параметров при исследовании поверхности методом многочастотной АСМ, которыми управляют с помощью метода перераспределения масс, который зависит от геометрии балки. Основной задачей является обеспечение совпадения резонансных частот с несколькими собственными гармониками.

Анализ полученных данных, т.е. диапазонов первых трех резонансных частот и коэффициента жесткости, позволил определить геометрические параметры кантилевера, удовлетворяющие условию кратности частот: длина 170 мкм, ширина 30 мкм и толщина 2 мкм. При этом параметры треугольного окончания составили: 30 мкм и высота 25 мкм. Для данных конструктивных параметров коэффициент жесткости и резонансные частоты составили 2,06 Н/м; 85,67 кГц; 450,27 кГц и 1100,3 кГц, соответственно.

**Заключение.** Реализована параметрическая модель кантилевера со стреловидной формой балки на основе поликристаллического кремния, специализированного для многочастотной атомно-силовой микроскопии. Численным методом определены диапазоны разрешенных значений для первых трех резонансных частот кантилевера,  $f_1$  – 50–250 кГц,  $f_2$  – 400–1500 кГц,  $f_3$  – 700–1900 кГц. Представлены аналитические зависимости коэффициента жесткости от геометрических параметров (длины, толщины, ширины): от 3,0 до 1,25 Н/м; 1,4 до 3,4 Н/м и от 2 до 50 Н/м. На основе полученных зависимостей выявлены наиболее оптимальные геометрические параметры конструкции стреловидного кантилевера для многочастотной АСМ: длина 170 мкм, ширина 30 мкм и толщина 2 мкм. При этом параметры треугольного окончания составили: 30 мкм и высота 25 мкм. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации существующих конструкций и разработки новых специализированных кантилеверов для многочастотной атомно-силовой микроскопии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Garcia R., Herruzo E.T.* The emergence of multifrequency force microscopy // *Nature Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 7. – P. 217-226.
2. *Balantekin M., Atalar A.* Enhanced higher-harmonic imaging in tapping-mode atomic force microscopy // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 87, No. 20. – P. 243513-243515.
3. *Dong M.* Determination of protein structural flexibility by microsecond force spectroscopy // *Nature Nanotechnology*. – 2009. – Vol. 4. – P. 514-517.
4. *Tetard L., Passion A., Thundat T.* New modes for subsurface atomic force microscopy through nanomechanical // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 5. – P. 105-109.
5. *Balke N.* Nanoscale mapping of ion diffusion in a lithium-ion battery cathode // *Nature Nanotechnology*. – 2010. – Vol. 5. – P. 749-754.
6. *Giessibl F.J.* Advances in atomic force microscopy // *Rev. Mod. Phys.* – 2003. – Vol. 75. – P. 949-983.
7. *Shamsudhin N., Rothuizen H., Nelson B.J. [et al.]* Multi-frequency atomic force microscopy: A system-theoretic approach // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2014. – Vol. 47, No. 3. – P. 7499-7504.
8. *Zhang W., Chen Y., Chu J.* Cantilever optimization for applications in enhanced harmonic atomic force microscopy // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2017. – Vol. 255. – P. 54-60.
9. *Cai J., Xia Q., Luz Y [et al.]* Optimal Design and Evaluation of Cantilever Probe for Multifrequency Atomic Force Microscopy. – URL: [http://web.aeromech.usyd.edu.au/WCSMO2015/papers/1158\\_paper.pdf](http://web.aeromech.usyd.edu.au/WCSMO2015/papers/1158_paper.pdf) (дата обращения: 02.02.2019).
10. *Малохатко С.В., Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю. [и др.]* Разработка и исследование модели двухбалочного кантилевера на основе поликристаллического кремния // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2017. – № 6 (191). – С. 234-243.
11. *Малохатко С.В., Гусев Е.Ю.* Моделирование резонансных частот поликремниевого кантилевера для многочастотной атомно-силовой микроскопии // *Матер. международной научно-технической конференции "INTERMATIC-2018"*, 19-23 ноября 2018. – С. 683-686.
12. *Быков А.В.* Моделирование отклонения кантилевера на основе поликристаллического кремния // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2015. – № 9 (170). – С. 145-150.
13. *Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакишева А.Г.* Микроэлектромеханические системы: учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.
14. *Краснобородько С.Ю.* Исследование и разработка комплекса методик для совершенствования функциональных и точностных характеристик атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии. – URL: [https://miet.ru/upload/iblock/5e4/Краснобородько\\_dis.pdf](https://miet.ru/upload/iblock/5e4/Краснобородько_dis.pdf) (дата обращения 2.12.2018).
15. *Павлов И., Хохлов А.* Физика твердого тела. – М.: Высшая школа, 2000. – 494 с.
16. *Васенков А., Епифанова В., Юдинцев В.* Микроэлектромеханические системы. Настало время выходить в свет. – URL: [http://computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov\\_3-5.htm](http://computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov_3-5.htm) (дата обращения 3.03.2017).
17. *Voisen A., Dohn S.* Cantilever-like micromechanical sensors // *Reports on Progress in Physics*. – 2011. – Vol. 74M, № 3. – P. 30.
18. *Ansari M.Z., Cho C.* A Study on Increasing Sensitivity of Rectangular Microcantilevers Used in Biosensors // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8. – P. 7530-7544.
19. *Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Михно А.С. [и др.]* Оптимизация конструкции контактно-металлизационной системы пьезокантилевера для атомно-силовой микроскопии // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 158-165.
20. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Коломийцев А.С.* Формирование наноразмерных структур на кремниевой подложке методом фокусированных ионных пучков // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2011. – № 1 (87). – С. 29-34.
21. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А. [и др.]* Модификация зондовых датчиков-кантилеверов для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – № 4. – С. 4-8.
22. *Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. [et al.]* Probe modification for scanning-probe microscopy by the focused ion beam method // *Russian Microelectronics*. – 2012. – Vol. 41, No. 1. – P. 41-50.
23. *Позняк Г.Г., Копылов В.В., Рогов В.А.* Современные методы проектирования нанотехнологических процессов в машиностроении. – М.: РУДН, 2008. – 114 с.

24. Назаров Д. Обзор современных программ конечно-элементного анализа. – URL: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=6797> (дата обращения 5.03.2017).
25. Гусев Е.Ю. Разработка технологии изготовления микромеханического акселерометра на основе поликристаллического кремния методами поверхностной микрообработки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 10 (183). – С. 52-64.
26. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and actuators A Physical. – 2002. – Vol. 99. – P. 3-12.

#### REFERENCES

1. Garcia R., Herruzo E.T. The emergence of multifrequency force microscopy, *Nature Nanotechnology*, 2012, Vol. 7, pp. 217-226.
2. Balantekin M., Atalar A. Enhanced higher-harmonic imaging in tapping-mode atomic force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 2005, Vol. 87, No. 20, pp. 243513-243515.
3. Dong M. Determination of protein structural flexibility by microsecond force spectroscopy, *Nature Nanotechnology*, 2009, Vol. 4, pp. 514-517.
4. Tetard L., Passion A., Thundat T. New modes for subsurface atomic force microscopy through nanomechanical, *Nature Nanotechnology*, 2010, Vol. 5, pp. 105-109.
5. Balke N. Nanoscale mapping of ion diffusion in a lithium-ion battery cathode, *Nature Nanotechnology*, 2010, Vol. 5, pp. 749-754.
6. Giessibl F.J. Advances in atomic force microscopy, *Rev. Mod. Phys.*, 2003, Vol. 75, pp. 949-983.
7. Shamsudhin N., Rothuizen H., Nelson B.J. [et al.]. Multi-frequency atomic force microscopy: A system-theoretic approach, *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, Vol. 47, No. 3, pp. 7499-7504.
8. Zhang W., Chen Y., Chu J. Cantilever optimization for applications in enhanced harmonic atomic force microscopy, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, Vol. 255, pp. 54-60.
9. Cai J., Xia Q., Luz Y [et al.]. Optimal Design and Evaluation of Cantilever Probe for Multifrequency Atomic Force Microscopy. Available at: [http://web.aeromech.usyd.edu.au/WCSMO2015/papers/1158\\_paper.pdf](http://web.aeromech.usyd.edu.au/WCSMO2015/papers/1158_paper.pdf) (accessed 02 February 2019).
10. Malokhatko S.V., Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu. [i dr.]. Razrabotka i issledovanie modeli dvukhbalochnogo kantilevera na osnove polikristallicheskogo kremniya [Development and research of a model of a double-girder cantilever based on polycrystalline silicon], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 234-243.
11. Malokhatko S.V., Gusev E.Yu. Modelirovanie rezonansnykh chastot polikremnievogo kantilevera dlya mnogochastotnoy atomno-silovoy mikroskopii [Modeling of resonant frequencies of a polysilicon cantilever for multifrequency atomic force microscopy], *Mater. mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "INTERMATIC-2018", 19-23 noyabrya 2018* [Proceedings of the international scientific and technical conference "INTERMATIC-2018", 19-23 November 2018], pp. 683-686.
12. Bykov A.V. Modelirovanie otkloneniya kantilevera na osnove polikristallicheskogo kremniya [Simulation of cantilever deflection based on polycrystalline silicon], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 145-150.
13. Gurtov V.A., Belyaev M.A., Baksheeva A.G. Mikroelektromekhanicheskie sistemy: ucheb. posobie [Microelectromechanical systems: a tutorial]. Petrozavodsk: Iz-vo PetrGU, 2016, 171 p.
14. Krasnoborod'ko S.Yu. Issledovanie i razrabotka kompleksa metodik dlya sovershenstvovaniya funktsional'nykh i tochnostnykh kharakteristik atomno-silovoy i magnitno-silovoy mikroskopii [Research and development of a set of techniques to improve the functional and accuracy characteristics of atomic force and magnetic force microscopy]. Available at: [https://miet.ru/upload/iblock/5e4/Krasnoborod'ko\\_dis.pdf](https://miet.ru/upload/iblock/5e4/Krasnoborod'ko_dis.pdf) (accessed 2 December 2018).
15. Pavlov I., Khokhlov A. Fizika tverdogo tela [Solid state physics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2000, 494 p.
16. Vasenkov A., Epifanova V., Yudintsev V. Mikroelektroomekhanicheskie sistemy. Nastalo vremya vykhodit' v svet [Microelectromechanical system. It's time to go out]. Available at: [http://computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov\\_3-5.htm](http://computer-museum.ru/books/vasenkov/vasenkov_3-5.htm) (accessed 3 March 2017).

17. *Boisen A., Dohn S.* Cantilever-like micromechanical sensors, *Reports on Progress in Physics*, 2011, Vol. 74M, No. 3, pp. 30.
18. *Ansari M.Z., Cho C.* A Study on Increasing Sensitivity of Rectangular Microcantilevers Used in Biosensors, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 7530-7544.
19. *Gusev E.Yu., Gamaleev V.A., Mikhno A.S [i dr.]*. Optimizatsiya konstruktsii kontaktno-metallizatsionnoy sistemy p'ezokantilevera dlya atomno-silovoy mikroskopii [Optimization of the design of the piezocantilever contact-metallization system for atomic force microscopy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 158-165.
20. *Konoplev B.G., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S.* Formirovanie nanorazmernykh struktur na kremnievoy podlozhke metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Formation of nanoscale structures on a silicon substrate by the method of focused ion beams], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2011, No. 1 (87), pp. 29-34.
21. *Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. [i dr.]*. Modifikatsiya zondovykh datchikov-kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probe sensors-cantilevers for atomic force microscopy by the method of focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano-and Microsystem technology], 2011, No. 4, pp. 4-8.
22. *Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. [et al.]*. Probe modification for scanning-probe microscopy by the focused ion beam method, *Russian Microelectronics*, 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 41-50.
23. *Poznyak G.G., Kopylov V.V., Rogov V.A.* Sovremennyye metody proektirovaniya nanotekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii [Modern methods of designing nanotechnological processes in mechanical engineering]. Moscow: RUDN, 2008, 114 p.
24. *Nazarov D.* Obzor sovremennykh programm konechno-elementnogo analiza [Review of modern programs of finite element analysis]. Available at: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=6797> (accessed 3 March 2017).
25. *Gusev E.Yu.* Razrabotka tekhnologii izgotovleniya mikromekhanicheskogo akselerometra na osnove polikristallicheskogo kremniya metodami poverkhnostnoy mikroobrabotki // *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 10 (183), pp. 52-64.
26. *French P.J.* Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensors and actuators A Physical*, 2002, Vol. 99, pp. 3-12.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Малохатко Софья Владимировна** – Южный федеральный университет; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +79289003841, кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

**Гусев Евгений Юрьевич** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; тел: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Агеев Олег Алексеевич** – e-mail: ageev@sfedu.ru; научно-образовательный центр «Нанотехнологии»; д.т.н.; профессор; чл.-корр. РАН.

**Malohatko Sofya Vladimirovna** – Southern Federal University; e-mail: malohatko.sofya@yandex.ru; 2, Shevchenko street, build. "E", Taganrog, 347928, Russia; phone: +79289003841; the department of nanotechnology and microsystems technology; post-graduate.

**Gusev Evgeny Yurievich** – e-mail: eyugusev@sfedu.ru; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Ageev Oleg Alexeevich** – e-mail: ageev@sfedu.ru; Research and Education Center "Nanotechnologies"; dr. of eng. sc.; professor; corr. member of RAS.