

Раздел V. Нанотехнологии и материаловедение

УДК 621.382:669.691.5

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-234-242

С.В. Малохатко, Е.Ю. Гусев, Ю.Ю. Житяева, А.В. Быков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ДВУХБАЛОЧНОГО КАНТИЛЕВЕРА НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Актуальной задачей зондовой микроскопии является разработка и оптимизация конструктивно-технологических решений, специализированных кантилеверов под широкий перечень её методик путем вариации выбора материала консоли, количества балок, их геометрии, внесения различных функциональных слоев. При этом выбор материала консоли отличного от традиционного, как и увеличение числа консолей, позволяют расширить диапазон функциональных характеристик кантилевера и использовать его в нескольких методиках. Целью данной работы является разработка конструкции двухбалочного кантилевера из поликристаллического кремния для колебательных методик атомно-силовой микроскопии. В работе представлены результаты численного моделирования отклонения консоли методом конечных элементов, а также проведены аналитические расчеты резонансной частоты и коэффициента жесткости. Рассмотрена конструкция кантилевера, состоящая из двух балок прямоугольной формы, расположенных по обе стороны основания, на свободных концах которых имеется острие. В качестве материала балок и острия использовали поликристаллический кремний. Толщина и ширина балок при расчетах оставались постоянными, равными 1,5 и 35 мкм соответственно. Моделирование выполнено при условии, что геометрические параметры острия и его положение не менялись: высота острия 8 мкм, радиус основания 3 мкм и радиус вершины 45 нм, а удаление от свободного края балки составляло 105 мкм. Рассчитанные значения отклонения консоли при увеличении силы статического воздействия с 100–1100 нН при фиксированном значении длины балки, равном 110 мкм, а также изменении ее длины с 10 до 250 мкм при силе от 100 до 1100 нН, составили от 20 до 300 и 20 до 260 нм, соответственно. Проведены аналитические расчеты коэффициента жесткости и резонансной частоты при изменении длины балки от 50 до 250 мкм. Полученные данные позволили определить конструкции двухбалочного кантилевера с геометрическими параметрами, обеспечивающими оптимальное соотношение отклонения, жесткости и резонансной частоты балок, и подходящие как для колебательных, так и контактных методик атомно-силовой микроскопии.

Микро- и наносистемная техника; атомно-силовая микроскопия; двухбалочный кантилевер; поликристаллический кремний.

S.V. Malohatko, E.Yu. Gusev, J.Y. Jityaeva, A.V. Bykov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODEL OF TWO-BEAM CANTILEVER ON THE BASIS OF POLYCRYSTALLINE SILICON

The actual task of probe microscopy is the development and optimization of constructive-technological solutions of specialized cantilevers for a wide range of its methods for choosing the options for selecting materials, their number, their geometry, and the introduction of various functional layers. In this case, the choice of console material, different from the traditional one, as well as increasing the number of consoles, allows expanding its functionality and using it in several methods. The aim of this work is the development of a two-beam cantilever made of polycrystalline silicon for the vibrational technique of atomic force microscopy. The paper presents the results of numerical simulation of the deviation from finite elements, and also provides analytical calculations of the resonant frequency and the stiffness coefficient. The construction of a cantilever con-

sisting of two beams of a rectangular shape located on both sides of the base, on the free ends of which there is a point, is considered. Polycrystalline silicon was used as a material for beams and a point. The thickness and width of the beams remained constant at 1.5 and 35 μm , respectively. The simulation was performed under the condition that the geometrical parameters of the tip and its position did not change: the tip height was 8 μm , the base radius was 3 μm and the tip radius was 45 nm, and the removal from the remaining beam parts was 105 μm . The calculated deviation values with an increase in the impact force of 100–1100 nN with a fixed beam length of 110 μm , as well as its length from 10 to 250 μm at a constant power from 100 to 1100 nN, from 20 to 300 and from 20 to 260 nm, respectively. Analytical calculations of the stiffness factor and resonance frequency with a change in length from 50 to 250 μm have been carried out (the question is why it has been shortened to a long, i.e., initial value from 10 to 50 μm). The obtained data made it possible to determine the design of a two-beam cantilever with geometric parameters providing an optimal ratio of the deviation, stiffness and resonant frequency of beams, and suitable for vibrational and contact methods of atomic force microscopy.

Micro- and nanosystems; atomic force microscopy; two-beam cantilever; polycrystalline silicon.

Введение. В современной науке и технике одним из перспективных направлений является нанoeлектроника [1]. Развитие данного направления не может быть полностью осуществлено без разработки новых методов изучения и исследования свойств поверхности твердых тел. Чрезвычайно информативным методом является сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ). Она позволяет проводить комплексное исследование проводящих и непроводящих поверхностей и может быть полезна как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях [3–6]. В настоящее время разработано достаточно большое количество методик СЗМ. Например, базовая комплектация Solver NEXT (НТ-МДТ) содержит около 60 различных методик [7].

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) в свою очередь применяется для исследования рельефа и модификации поверхности образца в нанометровом разрешении [8]. Существует несколько измерительных методик АСМ: контактная, амплитудно-модуляционная или полуконтактная, силовая литография и т.д. [9]. Во всех случаях используется кантилевер, который состоит из стандартного основания и упругой консоли с острием на свободном конце (рис. 1).

В контактной методике атомно-силовой микроскопии острие зонда находится в контакте с поверхностью образца. В данном методе действуют силы отталкивания. Главным недостатком данной методики является механическое взаимодействие с образцом, что может привести к поломке зонда или разрушению поверхности образца в момент исследования. В основе колебательной методики АСМ лежит регистрация параметров взаимодействия кантилевера, который совершает колебания с исследуемой поверхностью. В связи с этим уменьшается механическое влияние на исследуемую поверхность, но в данной методике система становится очень чувствительной к посторонним вибрациям, что приводит к возникновению шумов. В основе бесконтактного метода лежит возбуждение колебаний кантилевера на определённую частоту [9–15].

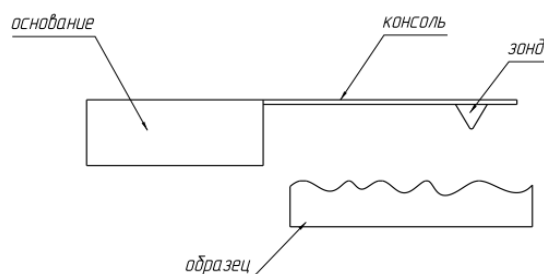


Рис. 1. Схематическое изображение кантилевера АСМ

В методе контактной атомно-силовой микроскопии острое зонда непосредственно соприкасается с поверхностью, в этом случае силы притяжения и отталкивания, действующие от образца, компенсируются силой упругости консоли. В колебательном методе атомно-силовой микроскопии в процессе сканирования используются колебательные методики, которые позволяют уменьшить последствия механического взаимодействия зонда с исследуемой поверхностью. В бесконтактном режиме кантилевер возбуждают так, чтобы он совершал вынужденные колебания с амплитудой приблизительно 1 нм. В основе метода микроскопии электростатических сил (МЭС) лежит принцип электростатического взаимодействия между кантилевером и образцом [15–23].

Во всех перечисленных методиках используется кантилевер и от его характеристик, таких как коэффициент жесткости и резонансная частота, зависят полученные результаты измерений. В связи с этим оптимизация существующих конструкций и разработка новых кантилеверов из различных материалов является актуальной задачей.

Цель работы заключается в разработке конструкции двухбалочного кантилевера из поликристаллического кремния с поликремниевым острием на свободном конце и исследование отклонения в зависимости от конструктивных параметров и оказываемого на него силового воздействия.

Использование поликристаллического кремния в качестве материала консоли и острия позволит расширить диапазон функциональных характеристик кантилевера, а также снизить стоимость их производства. Двухбалочная конструкция позволит использовать один и тот же кантилевер для нескольких методик.

Методика моделирования. Конструкция кантилевера состоит из стандартного основания, используемого в существующих методиках АСМ, и двух консолей-балок прямоугольной формы различной длины (рис. 2) На свободном конце балок расположены острия, параметры которых считаются постоянными.

При проведении моделирования методом конечных элементов использовалась неравномерная тетраэдрическая сетка [24]. Параметры модели и сетки приведены в табл. 1. Сходимость численного решения соблюдалась при задании точности равной 10^{-6} .



Рис. 2. Двухбалочная конструкция кантилевера

Для определения оптимальной геометрии кантилевера проведено исследование влияния размеров балок. При этом изменялись длина, а толщина и ширина оставалась неизменной.

Таблица 1

Параметры модели и сетки

Параметр	Значение
Длина консольной балки, мкм	10-250
Ширина консольной балки, мкм	35
Толщина консольной балки, мкм	1,5
Нижний радиус острия, мкм	3
Верхний радиус острия, мкм	0,05
Высота острия, мкм	8
Максимальный размер элементов сетки вдоль криволинейных границ, мкм	0,6
Количество элементов сетки	2995-5225

Параметры поликристаллического кремния, которые учитывались при моделировании приведены в табл. 2 [25].

Таблица 2

Основные свойства поликристаллического кремния

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

Коэффициент жесткости определяет чувствительность кантилевера, то есть соотношение между силой, действующей на зонд, и отклонением кантилевера. В работе проведены расчеты коэффициента жесткости по следующей формуле [25]:

$$k = \frac{Ewt^3}{4l^3},$$

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

Результаты исследования. Исследование конструкции двухбалочного кантилевера на основе поликристаллического кремния с использованием описанной модели выполнено для каждой балки.

Получено отношение отклонения кантилевера относительно приложенной силы при длине кантилевера 110 мкм (рис. 3).

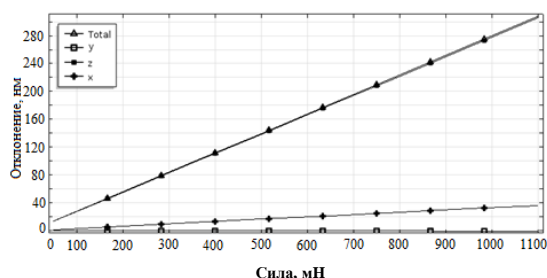


Рис. 3. Зависимость отклонения кантилевера от силы прижима

При увеличении силы от 50 до 1100 нН, отклонение увеличивается от 20 до 300 нм. Такое отношение отклонения к длине определяется пропорциональной зависимостью силы от деформации согласно закону Гука.

Получено отношение отклонения кантилевера от его длины (рис. 4).

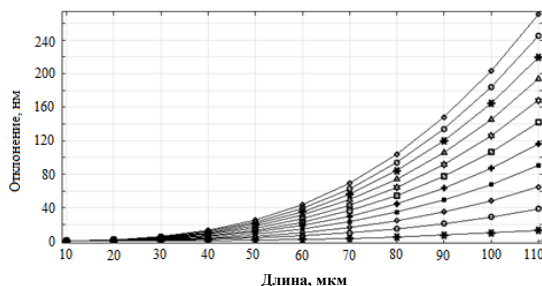


Рис. 4. Зависимость отклонения от длины кантилевера при силе от 100 до 1100 нН с шагом 100 нН

Как видно из зависимостей при увеличении длины от 10 до 110 мкм отклонение увеличивается от 20 нм до 260 нм.

Рассчитаны значения нормированного коэффициента жесткости ($k' = k/(w \cdot l^3)$) при изменении длины от 50 до 250 мкм (рис. 5).

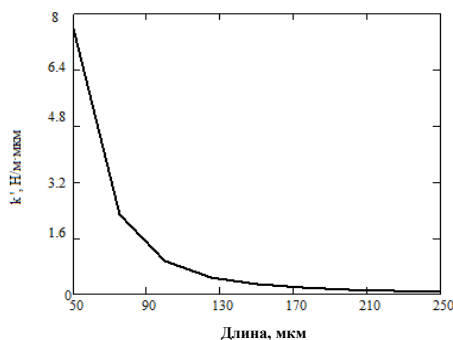


Рис. 5. Зависимость нормированного коэффициента жесткости от длины кантилевера

При увеличении длины нормированный коэффициент жесткости уменьшается с 8 до 0,5 Н/м·мкм.

Далее определены значения резонансной частоты при изменении длины от 50 до 250 мкм (рис. 6).

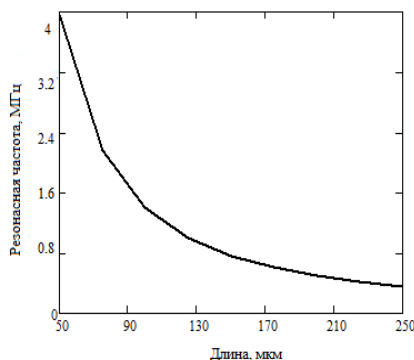


Рис. 6. Зависимость резонансной частоты от длины кантилевера

Из рис. 6 видно, что при увеличении длины кантилевера его резонансная частота уменьшается, такое поведение связано с уменьшением коэффициента жесткости и увеличением массы балки согласно [12]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m_{\text{eff}}}},$$

где k – коэффициент жесткости, m_{eff} – эффективная масса.

Отклонение кантилевера является одним из основных параметров при исследовании поверхности, им можно управлять с помощью варьирования длины (геометрических параметров). Однако при достаточном увеличении длины значительно уменьшается коэффициент жесткости, что приводит к уменьшению чувствительности и резонансной частоты, снижается помехозащищенность, что отрицательно сказывается на получении АСМ-данных о поверхности и результатах исследования.

Полученные диапазоны длин от 10 до 250 мкм, а также вычисленные жесткость и резонансная частота в диапазонах от 8 до 0,5 Н/м·мк и от 4 до 0,3 МГц позволяет охватить широкий диапазон конструктивных решений консоли кантилевера для различных методик АСМ, таких как бесконтактная, контактная, амплитудно-модуляционная, микроскопия электрических сил и многие другие. Однако в дальнейшем необходимо предусмотреть наличие отражающих, проводящих слоев и магнитных слоев, таких как поликристаллический сплав CoCr, железо, оксид цинка и сплавы железа. Магнитные слои чаще всего локализованы на острие иглы кантилевера. Так как магнитные материалы имеют низкую устойчивость к коррозии, то подразумевается нанесение защитных пленок, чтобы избежать ухудшения чувствительности.

Необходимо отметить, что при изготовлении рассмотренного двухбалочного кантилевера количество технологических операций не отличается от количества операций по изготовлению традиционных кантилеверов, что позволяет не только расширить область их использования, но также снизить расход материалов и эффективную стоимость одной балки.

Заключение. В качестве образца выбрана модель кантилевера, состоящего из закрепленных на двух сторонах прямоугольных балок и острия на их свободных концах. Приведена зависимость отклонения от силы, приложенной к вершине острия кантилевера. При увеличении силы от 50 до 1100 нН, отклонение увеличивается с 20 до 300 нм. Получена зависимость отклонения кантилевера при силе прижима 100 нН. При этом с увеличением длины от 10 до 110 мкм отклонение увеличивается от 20 до 260 нм.

Рассмотренная конструкция двухбалочного кантилевера на основе поликристаллического кремния может быть применена в атомно-силовых методиках исследования поверхности, включая амплитудно-модуляционную, полуконтактную, контактную, а также в магнитно-силовой микроскопии и силовой литографии. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции кантилеверов и разработки новых технологических решений для различных методик атомно-силовой микроскопии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Южного федерального университета (внутренний грант ВнГр-07/2017-02). Результаты получены с использованием инфраструктуры Научно-образовательного центра «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Giessibl F.J.* Advances in atomic force microscopy // *Rev. Mod. Phys.* – 2003. – Vol. 75. – P. 949-983.
2. *Peter E., Paul W.* Atomic Force Microscopy. – London: OxfordUniversityPress, 2010. – 283 p.
3. ЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Исследование топографии поверхности твердых тел методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме. – URL: http://phys.spbau.ru/files/AFM_v.n2.0.pdf (дата обращения 2.03.2017).
4. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с.
5. *Bharat Bhushan.* Springer Handbook of Nanotechnology. – London: Springer Science & Business Media, 2010. – 1964 p.
6. *Варадан В., Виной К., Джозе К.* ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.
7. ИНТЕГРА Спектра II. Многофункциональная автоматизированная система для АСМ-Раман, СБОМ и TERS исследований. – URL: <https://www.ntmdt-si.ru> (дата обращения 15.04.2017).
8. *Быков В.А.* Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // *Микросистемная техника.* – 2000. – № 1. – С. 21-32.

9. *Быков А.В.* Конструктивно-технологические особенности кантилеверов для атомно-силовой микроскопии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 9 (158). – С. 143-148.
10. *Johnson R.L.* Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers: thesis. Master of Science. – Ames: Iowa State University, 2005. – 109 p.
11. *Быков А.В.* Моделирование отклонения кантилевера на основе поликристаллического кремния // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 9 (170). – С. 145-150.
12. *Быков В.А.* Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхности: дисс. д-ра. техн. наук. – М.: Гос. НИИ физ. Проблем им. Ф.В. Лукина, 2000. – 393 с.
13. *Гуртов В. А., Беляев М. А., Бакиеева 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 (дата обращения 2.02.2017).
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 (дата обращения 3.03.2017).
17. *Boisen A., Dohn S.* Cantilever-like micromechanical sensors // Reports on Progress in Physics. – 2011. – Vol. 74M, No. 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., Быков А.В., Житяева Ю.Ю.* 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., Коломийцев А.С., Ильин О.И.* 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., Kolomiitsev A.S., Serbu N.I.* 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. *French P.J.* Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and actuators A Physical. – 2002. – Vol. 99. – P. 3-12.

REFERENCES

1. *Giessibl F.J.* Advances in atomic force microscopy, *Rev. Mod. Phys.*, 2003, Vol. 75, pp. 949-983.
2. *Peter E., Paul W.* Atomic Force Microscopy. London: Oxford University Press, 2010, 283 p.
3. ТСКР «Materialovedenie i diagnostika v peredovykh tekhnologiyakh» pri FTI im. A.F. Ioffe. Issledovanie topografii poverkhnosti tverdykh tel metodom atomno-silovoy mikroskopii v polukontaktном rezhime [Investigation of the topography of the surface of solids by atomic force microscopy in a semi-contact mode]. Available at: http://phys.spbau.ru/files/AFM_v.n2.0.pdf (accessed 2 March 2017).
4. *Mironov V.L.* Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Basics of scanning probe microscopy]. Nizhny Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 2004, 114 p.
5. *Bharat Bhushan.* Springer Handbook of Nanotechnology. London: Springer Science & Business Media, 2010, 1964 p.

6. *Varadan V., Vinoy K., Dzhoze K.* VCh MEMS i ikh primeneniye [HF MEMS and their application]. Moscow: Tekhnosfera, 2004, 528 p.
7. NTEGRA Spektra II. Mnogofunktional'naya avtomatizirovannaya sistema dlya ASM-Raman, SBOM i TERS issledovaniy [Spectra II. A multifunctional automated system for AFM-Raman, SNOM and TERS research]. Available at: <https://www.ntmdt-si.ru> (accessed 15 April 2017).
8. *Bykov V.A.* Mikromekhanika dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii i nanotekhnologii [Micromechanics for scanning probe microscopy and nanotechnology], *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology], 2000, No. 1, pp. 21-32.
9. *Bykov A.V.* Konstruktivno-tekhnologicheskie osobennosti kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii [Structural and technological features of cantilevers for atomic force microscopy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 143-148.
10. *Johnson R.L.* Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro-cantilevers: thesis. Master of Science. Ames: Iowa State University, 2005, 109 p.
11. *Bykov A.V.* Modelirovaniye otkloneniya kantilevera na osnove polikristallicheskogo kremniya [Modeling of cantilever deviation based on polycrystalline silicon], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 145-150.
12. *Bykov V.A.* Pribory i metody skaniruyushchey zondovoy mikroskopii dlya issledovaniya i modifikatsii poverkhnosti: diss. d-ra. tekhn. Nauk [Instruments and methods of scanning probe microscopy for the study and modification of the surface. Dr. eng. sc. diss.]. Moscow: Gos. NII fiz. Problem im. F.V. Lukina, 2000, 393 p.
13. *Gurtov V. A., Belyaev M. A., Baksheeva A.G.* Mikroelektromekhanicheskie sistemy: ucheb. Posobie [Microelectromechanical systems: textbook]. 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 for improving the functional and accuracy characteristics of atomic force and magnetic force microscopy]. Available at: https://miet.ru/upload/iblock/5e4/Krasnoborod'ko_dis.pdf (accessed 2 February 2017).
15. *Pavlov I., Khokhlov A.* Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. Moscow: Vysshaya shkola, 2000, 494 p.
16. *Vasenkov A., Epifanova V., Yudinsev V.* Mikroelektroomekhanicheskie sistemy. Nastalo vremya vykhodit' v svet [Microelectroomechanical systems. It's time to go out]. Available at: 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., Bykov A.V., Zhityaeva Yu.Yu.* Optimizatsiya konstruksii kontaktno-metallizatsionnoy sistemy p'ezokantilevera dlya atomno-silovoy mikroskopii [Optimization of the construction of the contact-metallization system of the piezocantilever 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.* Formirovaniye nanorazmernykh struktur na kremnievoy podlozhke metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Formation of nanosized 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., Kolomiitsev A.S., Il'in O.I.* Modifikatsiya zondovykh datchikov-kantileverov dlya atomno-silovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Il'in O.I. Modification of probe 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., Kolomiitsev A.S., Serbu N.I.* 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 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 5 March 2017).
25. *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.т.н. О.А. Агеев.

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

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

Житяева Юлия Юрьевна – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; аспирант.

Быков Александр Викторович – ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина»; e-mail: admin@niifp.ru; 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом 6; тел.: +74997311306.

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

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

Jityaeva Juliya Yurievna – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; postgraduate student.

Bykov Alexander Victorovich – F.V. Lukin State Research Institute of Physical Problems; e-mail: admin@niifp.ru; Building 6, Passage 4806, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia; phone: +74997311306.

УДК 666.655

DOI 10.23683/2311-3103-2017-6-242-249

М.А. Мараховский, А.А. Панич

ПОЛУЧЕНИЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ СИСТЕМЫ PMN-PT МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Работа посвящена исследованию различных методов спекания керамики из многокомпонентной системы $(1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-xPbTiO_3$ (PMN-PT), имеющей высокий прикладной потенциал. Помимо преимуществ, материалы указанной системы обладают и недостатками, возникающими в процессе изготовления. С целью устранения недостатков при изготовлении, кроме традиционных методов спекания в камерной печи в атмосферном давлении и горячего прессования, керамические образцы были изготовлены новым перспективным методом искрового плазменного спекания (SPS). Метод SPS по сравнению с традиционным спеканием при атмосферном давлении, позволяет проводить процесс спекания за десятки минут, при сниженных на 100–300 °С, температурах спекания, обеспечивая мелкозернистую монофазную структуру керамики. Такая микроструктура способствует повышению механических и электрофизических параметров получаемой керамики. Методами рентгенофазового анализа и растровой электронной микроскопии установлены зависимости формируемой керамической структуры от одноосного механического давления при спекании и от температуры процесса. Актуальность работы состоит в совершенствовании технологического процесса изготовления керамики за счёт снижения температуры спекания, сокращения продолжительности процесса и, соответственно, сокращения энергозатрат на нагрев. Новизна работы состоит в сопоставлении результатов спекания керамики PMN-PT методом искрового плазменного спекания с результатами спекания другими способами (спекание в камерной печи, горячее прессование), сравнении полученных параметров, обозначении преимуществ и