

Раздел IV. Наносистемная техника

УДК 629.052.7

А.В. Быков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ КАНТИЛЕВЕРА НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Целью работы является разработка модели микрокантилевера на основе поликристаллического кремния и получение с ее помощью зависимостей влияния геометрических параметров на его чувствительность. Это позволит провести оптимизацию конструкции микрокантилеверов, которые используются в атомно-силовой микроскопии с оптической системой регистрации отклонения. Представлены результаты моделирования микрокантилевера методом конечных элементов. Предложена конструкция микрокантилевера, состоящая из балки и острия. Принималось, что балка поликристаллического кремния закреплена с одной стороны и имеет следующие размеры: толщина 2 мкм, ширина 30 мкм и длина 95 мкм. На свободной части балки расположено острие из поликристаллического кремния высотой 15 мкм, радиусом основания 2 мкм, и радиусом вершины 35 нм. В модели учтена непрямоугольная форма свободного края балки, получаемая в результате технологического процесса изготовления зонда. Толщина и ширина балки, размеры острия и параметры материалов оставались неизменными. Проведено численное моделирование влияния длины кантилевера и силы прижима на отклонение и резонансную частоту. При этом значения длины балки и силы прижима изменялись в диапазонах от 60 до 300 мкм и 0,05–1 мкмН соответственно. В результате получены зависимости отклонения от приложенной силы 0,05–1 мкмН при фиксированной длине 95 мкм, от длины 60–120 мкм при фиксированной силе 50 нН, а также зависимости первых трех собственных частот от длины кантилевера. Результаты, полученные в работе, позволят выработать рекомендации к проектированию конструкции кантилевера, при которой чувствительность максимальна.

Наносистемная техника; кантилевер; отклонение кантилевера; монокристаллический кремний; поликристаллический кремний; атомно-силовая микроскопия.

A. V. Bykov

SIMULATION OF THE POLYCRISTALLINE SILICON CANTILEVER DEFLECTION

The goal of the work is development of a model of microcantilever and obtaining the dependences of cantilever geometrical parameters influence its sensitivity. The results can be used to optimize the microcantilevers design for atomic force microscopes with optical registration system. This paper presents results of microcantilever modeling using finite element. The design of the polycrystalline silicon microcantilever was offered. It consists of the beam fixed on the one hand, a thickness of 2 μm , a width of 30 μm and a length of 95 μm . The probe with height of 15 μm , base radius 2 μm , and an apex radius 35 nm is located on the free side edge of the cantilever. The model takes into account a non-rectangular shape of the free edge of the cantilever that is formed during the probe fabrication. The thickness and width of the beam, the dimensions of the probe, material parameters were fixed. The results of the simulation of the cantilever length and the pressing force on the deflection and eigen frequencies were shown. The length and applied

force varied from 60 to 300 μm and 0,05 to 1 μN , respectively. The dependence of the deflection on the applied force 0,05–1 μN at the fixed length of 95 μm , on the length of 60–120 μm at the fixed force of 50 nN, and the dependences of the first three eigen frequencies on the cantilever length were obtained. The results obtained in the work will allow to develop recommendations for the design of a microcantilever structure with high sensitivity.

Nanosystems; cantilever; beam deflection; monocrystalline silicon; polycrystalline silicon; atomic force microscopy.

Введение. Важной проблемой в изучении материалов и технологий является получение качественного представления о поверхности образца. Для ее детального исследования существует много разнообразных методов [1]. Традиционным методом получения таких сведений является сканирующая зондовая микроскопия [2]. Изобретение атомно-силовой микроскопии (АСМ) в конце XX в., позволило проводить исследования поверхностей как проводящих, так и непроводящих материалов [3].

Основным инструментом атомно-силовой микроскопии являются микрокантилевер, состоящий из упругой балки, закрепленной с одной стороны, и зонда, расположенного на свободном конце [4]. Принцип работы АСМ основан на измерении вертикального и горизонтального отклонения кантилевера [2]. В большинстве случаев для этого используется оптическая система регистрации, которая является простой и недорогой в использовании, но позволяющей проводить исследования с высокой точностью (нанометровое разрешение) [5].

Существует два основных режима работы АСМ: контактный и бесконтактный [2]. В контактном режиме зонд непосредственно соприкасается с поверхностью образца, в результате чего может быть достигнуто атомарное разрешение. Однако это может привести к разрушению образца, особенно при изучении биологических объектов. В бесконтактном режиме с частотной модуляцией АСМ кантилевер колеблется вокруг своей резонансной частоты с постоянной амплитудой и не касается при этом поверхности образца. Этот режим не повреждает поверхность образца, но у него меньшее разрешение и сложная система обратной связи.

Принцип работы оптической системы представлен на рис. 1. Лазерный луч, отраженный от задней поверхности кантилевера, попадает на позиционно-чувствительный фотоприемник [3]. Точность измерения отклонения во многом зависит от соотношения сигнал-шум. Основной составляющей шума в сигнале является тепловой дрейф. Для улучшения этого соотношения резонансная частота кантилевера должна быть как можно больше. Таким образом, для увеличения общей чувствительности, необходимо выбрать конструкцию кантилевера, обеспечивающую оптимальное соотношение отклонения и резонансной частоты, которое зависит от геометрии и свойств материалов. Моделирование структуры АСМ и силы прижима имеет также важное значение для интерпретации экспериментальных данных и оценки поверхности образца [6–8]. В следствии чего оптимизация существующих конструкций, разработка новых микрокантилеверов и методов их изготовления является актуальной задачей [9–12].

Колебательные методики активно применяются в АСМ. Для их использования необходимо точно знать резонансную частоту, которая зависит от конструкции выбранного кантилевера и материалов, использованных для его изготовления [13].

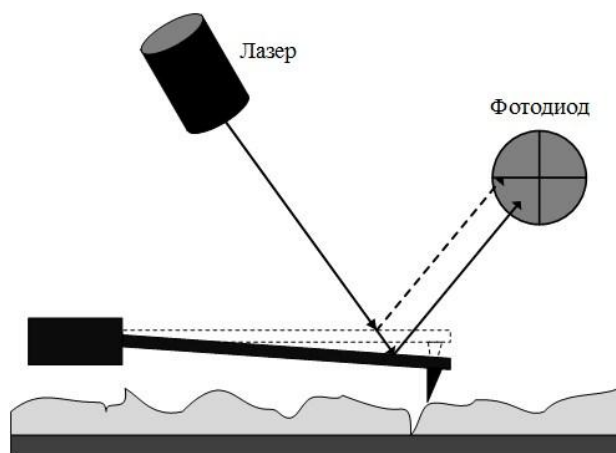


Рис. 1. Схема оптической системы регистрации изгиба кантилевера

Целью данной работы является разработка модели микрокантилевера и получение с ее помощью зависимости влияния геометрических параметров кантилеверов на их чувствительность для дальнейшей оптимизации конструкции микрокантилеверов оптических АСМ.

Методика моделирования. Моделирование микрокантилевера проводили методом конечных элементов. В качестве материала использовали поликристаллический кремний [14]. В модели микрокантилевер состоит из прямоугольной балки, закрепленной с одной стороны, и острия, расположенного на свободном конце (рис. 2). Геометрические параметры конструкции кантилевера приведены в табл. 1. Длину варьировали от 60 до 300 мкм. В работе учитывали не прямоугольную форму свободного края кантилевера, которая получается при изготовлении зонда методом объемной микрообработки.

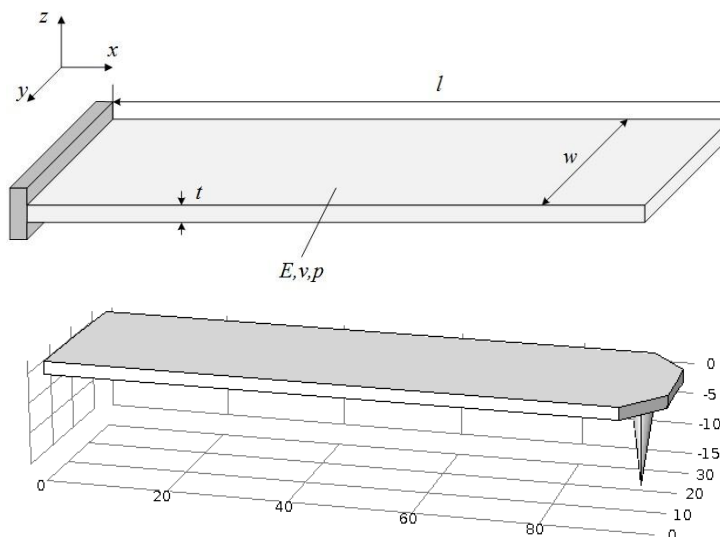


Рис. 2. Эскиз конструкции кантилевера, используемого при численном моделировании (вверху) и его геометрическая модель (внизу)

Таблица 1

Геометрические параметры конструкции микрокантилевера

Параметр	Значение, мкм
Длина (l)	90
Ширина(w)	30
Толщина(t)	2
Длина зонда	15
Радиус основания зонда	2
Радиус закругления	0,035

При численном моделировании использовали неравномерную тетраэдрическую сетку. Типичный вид сетки, содержащей не менее 10^4 элементов показан на рис. 3.

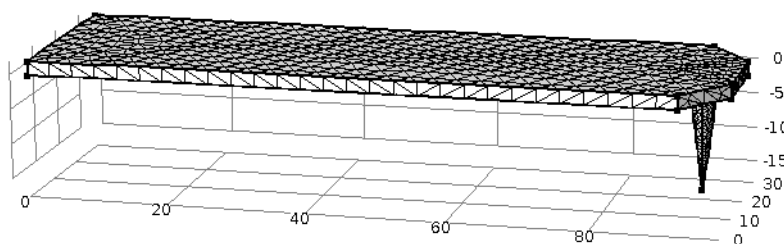


Рис. 3. Неравномерная тетраэдрическая сетка

Параметры поликристаллического кремния, которые учитывали в физической модели приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства материалов [15]

Параметр	Значение
Модуль Юнга, ГПа	169
Плотность, кг/м ³	2100
Коэффициент Пуассона, -	0,22

В работе проводили моделирование влияния силы и длины кантилевера на величину отклонения. Силу изменяли от 50 нН до 1 мкН с шагом 100 нН при длине кантилевера 95 мкм, а также длину кантилевера от 60 до 120 мкм, с шагом 20 мкм при постоянной силе 50 нН. Силовое воздействие прикладывали к вершине острия кантилевера вдоль оси z.

Также рассчитывали значения собственных частот для микрокантилеверов длиной 60, 80, 95, 120 и 300 мкм.

Результаты моделирования. Отклонение поликристаллического микрокантилевера под действием силы 50 нН составило 3,77 нм и показано на рис. 4.

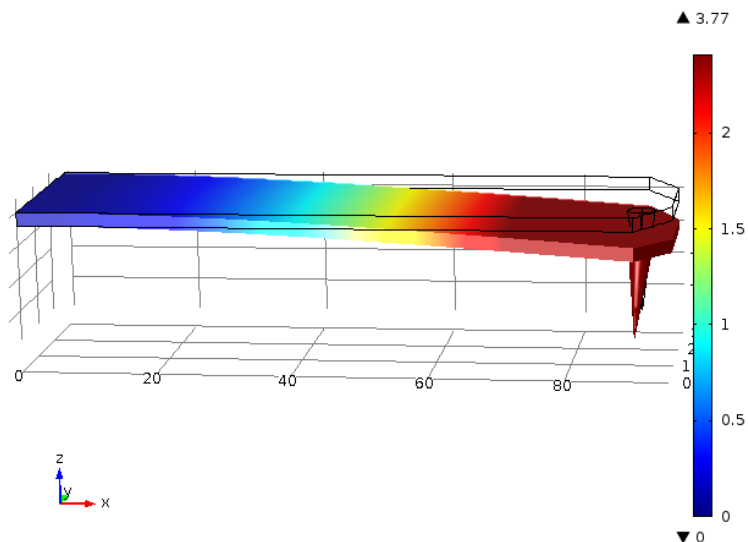


Рис. 4. Отклонение кантилевера (в нм) длиной $L = 95$ мкм под действием силы прижима $F = 50$ нН

Зависимость перемещения микрокантилевера от приложенной силы при длине кантилевера 95 мкм, приведена на рис. 5. Из рисунка видно, что при увеличении силы от 50 нН до 1 мкН, отклонение увеличивается с 5 до 100 нм. Такое поведение соответствует известному закону Гука, где сила прямо пропорциональна деформации ($f = -kx$, где k – константа жесткости, x – отклонение) [16].

Зависимость отклонения микрокантилевера от его длины при силе прижима 50 нН показана на рис. 6. Длина кантилевера изменялась от 60 до 120 мкм.

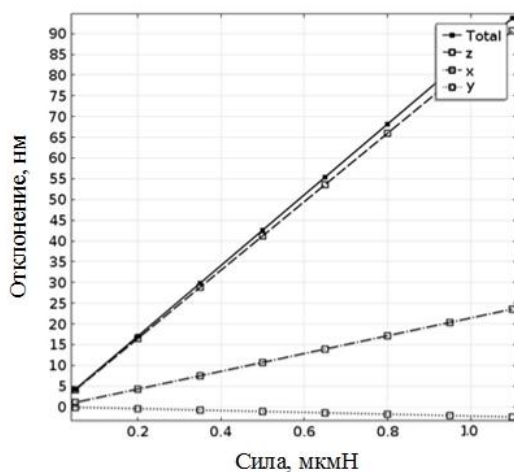


Рис. 5. Зависимость отклонения кантилевера (в нм) от силы прижима

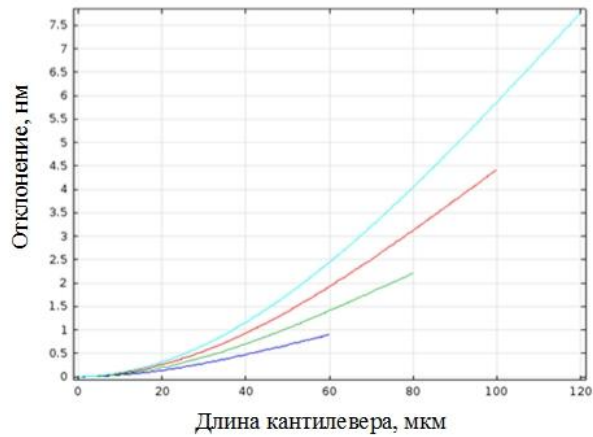


Рис. 6. Зависимость отклонения кантилевера под действием силы прижима $F = 50 \text{ нН}$ от длины кантилевера

Расчитанные значения собственных частот микрокантилеверов длиной 60, 80, 95, 120 и 300 мкм представлены в табл. 3. График зависимости первых трех частот от длины представлен на рис. 7.

Таблица 3

Значения резонансных частот кантилевера в МГц

Порядок частоты	Длина кантилевера, мкм				
	60	80	95	120	300
f_1	0,793	0,433	0,313	0,195	0,03
f_2	3,493	2,495	1,958	1,223	0,194
f_3	4,922	2,767	2,053	1,585	0,458

Значения резонансных частот должны быть максимально высокими, чтобы избежать возбуждения собственных колебаний из-за перемещения кантилевера относительно поверхности образца при проведении сканирования [17]. График зависимости первых трех собственных частот от длины представлен на рис. 7.

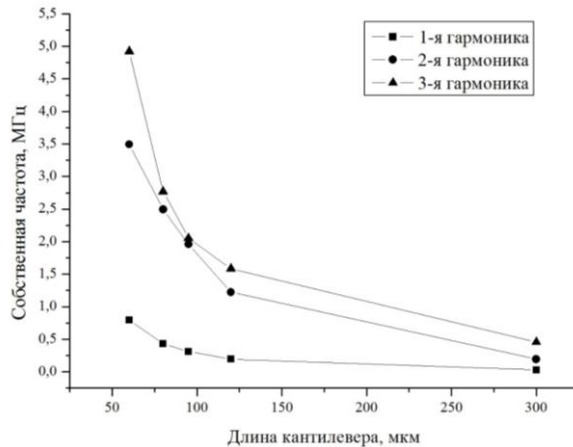


Рис. 7. График зависимости частоты от длины кантилевера

Как видно из рис. 7 при увеличении длины микрокантилевера его резонансная частота уменьшается. Это объясняется увеличением массы и уменьшением жесткости микрокантилевера при увеличении его длины. Резонансная частота в динамическом режиме работы определяется следующим выражением [19]:

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

где k – константа жесткости кантилевера, а m_{eff} – эффективная масса.

При этом константа жесткости связана с длиной кантилевера(1) следующим образом [20]:

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

где E – модуль Юнга, t , w – толщина и ширина кантилевера соответственно.

Полученные результаты численного моделирования подтверждаются известными аналитическими оценками и являются более точными [21]. Результаты также коррелируют с данными [22].

Для увеличения чувствительности оптической системы регистрации предпочтительно увеличивать степень отклонения микрокантилевера при фиксированной силе его взаимодействия с поверхностью исследуемых материалов. Это можно достичь путем увеличения длины кантилевера. Однако при этом будет расти инерционная масса и уменьшаться значение жесткости, что приводит к снижению резонансной частоты колебаний. Значительное увеличение длины приведет к появлению дополнительных шумов и снижению чувствительности. Для оптимизации конструкции кантилевера необходимо учитывать область его применения, т.е. использования в контактной или колебательной моде АСМ.

Заключение. За основу выбрана модель микрокантилевера для АСМ, состоящего из закрепленной с одной стороны прямоугольной балки и острия на свободном конце. Получена зависимость общего отклонения от силы, приложенной к вершине острия кантилевера вдоль оси z . При увеличении силы с 50 нН до 1 мкН отклонение увеличивается с 5 до 100 нм. Приведена зависимость отклонения микрокантилевера при силе прижима 50 нН. При этом с увеличением длины микрокантилевера от 60 до 120 нм отклонение увеличивается от 1 до 8 нм. Получена зависимость собственных частот кантилевера от его длины. Подтверждается уменьшение резонансной частоты при увеличении длины кантилевера.

Полученные данные могут быть использованы при оптимизации конструкции микрокантилеверов АСМ. В дальнейшем предполагается учесть наличие отражающего/проводящего покрытия(ий).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bhushan B.* Springer Handbook of Nanotechnology. – Heidelberg: Dordrecht: London: New York: Springer, 2010. – 1964 p.
2. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – С. 15-68.
3. *Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // *Jpn. Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, No. 9. – P. 930-933.
4. *Быков А.В.* Конструктивно-технологические особенности кантилеверов для атомно-силовой микроскопии // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 9 (158). – С.141-151.
5. *Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г.* Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.

6. Zhang G., Zhao L., Jiang Z. Surface stress-induced deflection of a microcantilever with various widths and overall microcantilever sensitivity enhancement via geometry modification // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2011. – Vol. 44. – P. 425402.
7. Ansari M.Z., Cho C., Kim J. [et al.] Comparison between Deflection and Vibration Characteristics of Rectangular and Trapezoidal profile Microcantilevers // *Sensors*. – 2009. – Vol. 9. – P. 2706-2718.
8. Ansari M. Z., Cho C. A Study on Increasing Sensitivity of Rectangular Microcantilevers Used in Biosensors // *Sensors*. – 2008. – Vol. 8. – P. 7530-7544.
9. Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Михно А.С., Быков А.В., Житяева Ю.Ю. Оптимизация конструкции контактно-металлизационной системы пьезокантлелера для атомно-силовой микроскопии // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2014. – № 9 (158). – С. 158-165.
10. Коноплёв 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.
11. Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И. Модификация зондовых датчиков-кантилелеров для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Нано- и микросистемная техника*. – 2011. – № 4. – С. 4-8.
12. 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.
13. Payam A.F. Sensitivity of flexural vibration mode of the rectangular atomic force microscope micro cantilevers in liquid to the surface stiffness variations // *Ultramicroscopy*. – 2013. – No. 135. – P. 84-88.
14. Величко Р.В., Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Михно А.С., Бычкова А.С. Исследование режимов плазмохимического осаждения пленок нано- и поликристаллического кремния // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11. – С. 1176-1179.
15. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // *Sensors and actuators A Physical*. – 2002. – Vol. 99. – P. 3-12.
16. Gere J.M., Timoshenko S.P. *Mechanical of materials*. – Boston: PWS Pub Co. – 1997. – 912 p.
17. Yeh M-K, Tai N-H, Chen B-Y. Influence of Poissons ratio variation on lateral spring constant of atomic force microscopy cantilevers // *Ultramicroscopy*. – 2008. – No. 108. – P. 1025-1029.
18. Senturia S.D. *Microsystem design*. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002. – 689 p.
19. Anshu M.G., Dinesh S.R. Modelling and Eigen frequency analysis of piezoelectric cantilever beam // *International Journal of Engineering Science*. – 2014. – Vol. 3, No. 7. – P. 52-59.
20. Zhang Y., Murphy K.D. Static and Dynamic Structural Modeling Analysis of Atomic Force Microscope // *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*. – 2009. – P. 225-257.
21. Shaik R.S., Sai V., Logesh S. Modelling and simulation of cantilever sensor using COMSOL Multiphysics // *International Journal of engineering, technology, management and research*. – 2014. – No. 1. – P. 6-8.
22. Ansari M.Z., Cho C., Kim J. Comparison between Deflection and Vibration Characteristics of Rectangular and Trapezoidal profile Microcantilevers // *Sensors*. – 2009. – No. 9. – P. 2709-2718.

REFERENCES

1. Bhushan B. *Springer Handbook of Nanotechnology*. Heidelberg: Dordrecht: London: New York: Springer, 2010, 1964 p.
2. Mironov V.L. *Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Fundamentals of scanning probe microscopy]*. Nizhny Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 2004, pp. 15-68.
3. Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope, *Jpn. Phys. Rev. Lett.*, 1986, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933.
4. Bykov A.V. Konstruktivno-tehnologicheskie osobennosti kantillevorov dlya atomno-silovoy mikroskopii [Design and technology features cantilevers for atomic force microscopy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2014, No. 4 (153), pp.141-151.

5. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
6. Zhang G., Zhao L., Jiang Z. Surface stress-induced deflection of a microcantilever with various widths and overall microcantilever sensitivity enhancement via geometry modification, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, Vol. 44, pp. 425402.
7. Ansari M.Z., Cho C., Kim J. [et al.] Comparison between Deflection and Vibration Characteristics of Rectangular and Trapezoidal profile Microcantilevers, *Sensors*, 2009, Vol. 9, pp. 2706-2718.
8. Ansari M. Z., Cho C. A Study on Increasing Sensitivity of Rectangular Microcantilevers Used in Biosensors, 2008, Vol. 8, pp. 7530-7544.
9. 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 [Structural optimization of the contact system of the piezocantilever for atomic force microscopy], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 9 (158), pp. 158-165.
10. Konoplev B.G., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S. Formirovanie nanorazmernykh struktur na kremnievoy podlozhke metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The formation of nanosize structures on a silicon substrate using focused ion beams], *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [Proceedings of universities. Electronics], 2011, No. 1 (87), pp. 29-34.
11. 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 [Modification of the probe-cantilever for atomic force microscopy using focused ion beams], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and Microsystem Technique], 2011, No. 4, pp. 4-8.
12. 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.
13. Payam A.F. Sensitivity of flexural vibration mode of the rectangular atomic force microscope micro cantilevers in liquid to the surface stiffness variations, *Ultramicroscopy*, 2013, No. 135, pp. 84-88.
14. Velichko R.V., Gusev E.Yu., Gamaleev V.A., Mikhno A.S., Bychkova A.S. Issledovanie rezhimov plazmokhimicheskogo osazhdeniya plenok nano- i polikristallicheskogo kremniya [The study of modes of plasma chemical deposition of nano- and polycrystalline silicon], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, No. 11, pp. 1176-1179.
15. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensors and actuators A Physical*, 2002, Vol. 99, pp. 3-12.
16. Gere J.M., Timoshenko S.P. Mechanical of materials. Boston: PWS Pub Co, 1997, 912 p.
17. Yeh M-K, Tai N-H, Chen B-Y. Influence of Poissons ratio variation on lateral spring constant of atomic force microscopy cantilevers, *Ultramicroscopy*, 2008, No. 108, pp. 1025-1029.
18. Senturia S.D. Microsystem design. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002, 689 p.
19. Anshu M.G., Dinesh S.R. Modelling and Eigen frequency analysis of piezoelectric cantilever beam, *International Journal of Engineering Science*, 2014, Vol. 3, No. 7, pp. 52-59.
20. Zhang Y., Murphy K.D. Static and Dynamic Structural Modeling Analysis of Atomic Force Microscope, *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*, 2009, pp. 225-257.
21. Shaik R.S., Sai V., Logesh S. Modelling and simulation of cantilever sensor using COMSOL Multiphysics, *International Journal of engineering, technology, management and research*. 2014, No. 1, pp. 6-8.
22. Ansari M.Z., Cho C., Kim J. Comparison between Deflection and Vibration Characteristics of Rectangular and Trapezoidal profile Microcantilevers // *Sensors*. – 2009. – № 9. – P. 2709-2718.

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

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

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; unit manager.

УДК 621.3.049.77

И.Е. Лысенко, О.А. Ежова, Ф.М. Бондарев, А.В. Ткаченко

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО СЕНСОРА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ С ТРЕМЯ ОСЯМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ*

Устройства микросистемной техники, такие как сенсоры линейных ускорений, сенсоры угловых скоростей, актюаторы широко применяются в различных областях: космическая промышленность, бытовые приборы, игры нового поколения, автомобилестроение и т.д. Устройства микросистемной техники широко применяются и в медицинской технике. Например, микромеханические сенсоры линейных ускорений используются в работе дефибрилляторов. Таким образом актуальной задачей на сегодняшний день является разработка конструкции сенсоров линейных ускорений. Основными целями при разработке микромеханических сенсоров является улучшение основных рабочих характеристик, уменьшение массогабаритных параметров сенсора и площади, занимаемой на подложке, а также снижение стоимости проектируемого изделия. В данной работе разработана и исследована конструкция сенсора линейных ускорений с тремя осями чувствительности, проведен модальный анализ разработанной конструкции по трем осям чувствительности, рассчитаны собственные формы и частоты колебаний разработанной конструкции, разработано описание исследуемой конструкции на языке высокого уровня VHDL-AMS, на основе которого проведено моделирование работы разработанного микромеханического многоосевого сенсора под действием линейных ускорений в программе hAMSter. В результате моделирования определена длительность воздействия линейных ускорений, определена амплитуда перемещений, пропорциональная величине действующего воздействия, определено время действия переходных процессов по осям чувствительности, определена начальная емкость преобразователей перемещений по осям чувствительности, определены изменения дифференциальных емкостей по осям чувствительности при действии линейного ускорения. Из результатов проведенных исследований видно, что конструкция упругого подвеса чувствительного элемента микромеханического акселерометра обеспечивает равенство частот по двум осям чувствительности.

Микросистемная техника; микроэлектромеханические системы; элементная база; микромеханический компонент; сенсор линейных ускорений; акселерометр; конструкция; модель; моделирование.

I.E. Lysenko, O.A. Ezhova, F.M. Bondarev, A.V. Tkachenko

ANALYSIS OF A DESIGN OF LINEAR ACCELERATION SENSOR WITH THREE SENSITIVE AXIS

Today microsystem technique develops extensively. Devices of microsystem technique such as sensors of linear acceleration, sensors of angle velocity, actuators and other devices are widely used in various areas: space industry, medical technology, consumer devices, game consoles of new generation, automotive industry and etc. Various devices of microsystem technology have become in-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России (проект №213.01–11/2014–12 в рамках базовой части государственного задания).