

REFERENCES

1. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Gromov A.L., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Modelirovanie rel'efa poverkhnosti podlozhki pri nanorazmernom profilirovanii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modeling of the surface topography of the substrate with nanoscale profiling method focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnology], 2014, Vol. 9, No. 1-2, pp. 44-48.
2. Luchinin V.V. Nanotekhnologii: fizika, protsessy, diagnostika, pribory [Nanotechnology: physics, processes, diagnostics, devices]. Moscow: Fizmatlit, 2006, 552 p.
3. Konoplev B.G., Ageev O.A. Elionnye i zondovye nanotekhnologii dlya mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Leonnies and probe nanotechnology for micro- and nanosystems technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 165-175.
4. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Gromov A.L., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie razreshayushchey sposobnosti nanorazmernogo profilirovaniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The study of nanoscale resolution profiling method focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnology], 2014, Vol. 9, No. 1-2, pp. 40-43.
5. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A., Kolomiitsev A.S., Serbu N.I. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.
6. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Issledovanie parametrov vzaimodeystviya fokusirovannykh ionnykh puchkov s podlozhkoy [The study of the interaction parameters of the focused ion beam to the substrate], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of higher educational institutions. Electronics], 2011, No. 3 (89), pp. 20-25.
7. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G. Formation of nanosize structures on a silicon substrate by method of focused ion beams, *Semiconductors*, 2011, Vol. 45, No. 13, pp. 89-92.
8. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Gromov A.L., Il'in O.I. Issledovanie rezhimov submikronnogo profilirovaniya poverkhnosti podlozhek kremniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The study of modes of submicron profiling the surface of the silicon substrates by the method of focused ion beams], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 171-180.

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

Коломийцев Алексей Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е, каб. Е-312; тел.: 88634371767; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники к.т.н.; доцент.

Kolomiitsev Alexey Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: askolomiitsev@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, room E-312, Taganrog, 347928; phone: +78634371767; the department of nanotechnologies and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 629.052.7

Е.Ю. Гусев, В.А. Гамалеев, А.С. Михно, А.В. Быков, Ю.Ю. Житяева

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ
КОНТАКТНО-МЕТАЛЛИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПЬЕЗОКАНТИЛЕВЕРА ДЛЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ***

Работа относится к области разработки кантиллеров с интегрированной системой регистрации отклонений консоли, на основе пьезоэлектрического эффекта. Ограничение применимости традиционных кантиллеров обусловлено потребностью во внешних аппаратных средствах – технически сложных системах оптической регистрации откло-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект № 14.575.21.0045).

нений. В качестве направления решения проблем миниатюризации и расширения области применения АСМ рассматривается разработка кантилеверов с интегрированной системой отклонений и их регистрации, в том числе на основе пьезоэлектрического эффекта. Известно, что применимость и свойства кантилевера определяются его конструкцией и геометрией. Проведено численное моделирование влияния различных вариантов конструкции контактно-металлизационной системы на отклонение, методом конечных элементов. Варьировалось количество электродов, их размеры и материал. Размеры и материал основания кантилевера и пьезоэлектрического слоя оставались неизменными. Результаты позволили определить конструкцию, обеспечивающую максимальное отклонение при фиксированном напряжении. Разработанная модель позволяет рассчитывать отклонения пьезокантилевера прямоугольной формы с произвольной встречно-штырьевой контактно-металлизационной системой и различными материалами функциональных слоев при подаче допустимых напряжений.

Кантилевер; пьезоэлектрический эффект; отклонение кантилевера; атомно-силовая микроскопия.

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

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE CONTACT SYSTEM OF THE PIEZOCANTILEVER FOR ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The work is related to development of cantilevers with integrated registration system of beam deflection, based on the piezoelectric effect. Restriction of traditional cantilevers applicability is conditioned by need for external hardware – technically difficult systems of optical deviations registration. As the direction of solving the miniaturization and extending the AFM scope problems, development of cantilever with the integrated system abnormalities and their registration, including on the basis of piezoelectric effect is considered. It is known that the applicability and properties of the cantilever are determined by its design and geometry. In this paper a numerical effect simulation of the various contact metallization system on design options the deviation by the finite element method is carried out. The number of electrodes, their dimensions and material had being varied. The dimensions and the material of a cantilever basis and piezoelectric layer remained unchanged. The results allowed quantifying a design that is providing the maximum deviation at the fixed voltage. The developed model allows calculating the deviations of a squared piezocantilever with inter-digitated contact metallization system and various materials of functional layers when submitting allowable voltages.

Cantilever; piezoelectric effect; beam deflection; atomic force microscopy.

Введение. Известно множество различных методов детального исследования поверхности твердых тел. Методы, основанные на увеличении изображения с помощью увеличительных линз и оптических микроскопов ведут свое начало с конца XVII столетия. Уже в XX веке были разработаны методы микроскопии с помощью электронных и ионных пучков. Атомно-силовая микроскопия (АСМ), изобретенная в 1986 г., произвела переворот в научном мире, предоставляя исследователям возможность делать топографические карты проводящих и непроводящих поверхностей с нанометровым разрешением [1–3].

В настоящее время зондовая микроскопия – это бурно развивающаяся область техники и прикладных научных исследований. За прошедшие годы применение зондовой микроскопии позволило достичь уникальных научных результатов в различных областях физики, химии и биологии [3–7].

В качестве технологического инструмента АСМ вступает зондовый датчик, основной элемент которого представляет упругую консоль (кантилевер) с острием на свободном конце. Среди известных ограничений применимости традиционных кантилеверов выделяют потребность во внешних аппаратных средствах – технически сложных системах оптической регистрации отклонений. В качестве направления решения проблем миниатюризации и расширения области применения АСМ рассматривается разработка кантилеверов с интегрированной системой отклонений и их регистрации, в том числе на основе пьезоэлектрического эффекта [8].

Появление новых конструкций кантилеверов обусловлено стремлением увеличить пространственное разрешение и порог минимально измеряемой силы взаимодействия [9, 10]. Если первое определяется геометрией острия кантилевера, то на величину последней в основном оказывают влияние конструкция кантилевера и геометрия его отдельных элементов.

На основе ранее предложенной конструкции [8] проводилось математическое моделирование отклонений пьезокантилеверов с различной геометрией контактно-металлизационной системы с помощью метода конечных элементов. Использовались размеры кремниевого основания (прямоугольная консоль $400 \times 240 \times 2$ мкм и окончание $150 \times 50 \times 2$ мкм), и пьезоэлектрического слоя ($390 \times 230 \times 0,6$ мкм) и оставались постоянными, изменялась форма и толщина встречно-штырьевой металлизации. На клеммы подавалось постоянное отклоняющее напряжение 5 В. Пример конструкции пьезокантилевера показан на рис. 1.

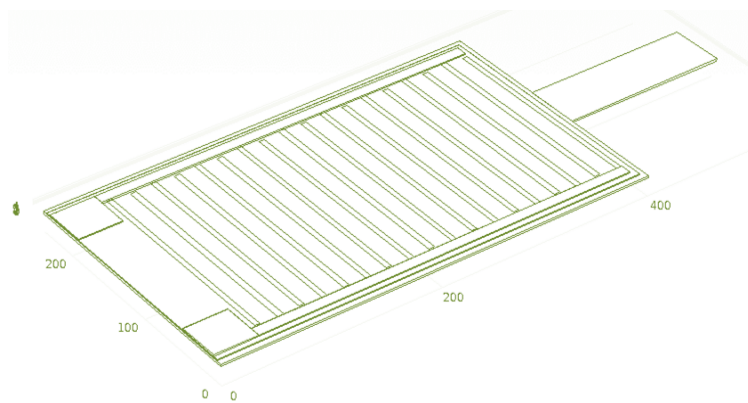


Рис. 1. Геометрическая модель конструкции пьезокантилевера

Для дискретизации использовалась неравномерная тетраэдрическая сетка. Для повышения точности вычислений размер каждого элемента дискретизации выбирался значительно меньше размеров каждой из частей моделируемого кантилевера. Пример дискретизации показан на рис. 2.

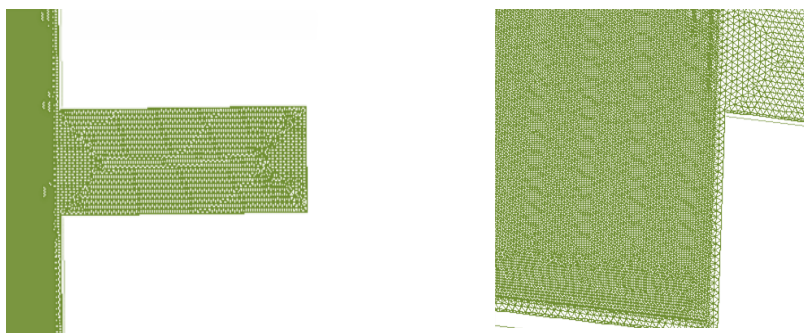


Рис. 2. Неравномерная тетраэдрическая сетка в различном масштабе

Вначале проводилось моделирование влияния количества электродов встречно-штырьевой системы на отклонение при различной ширине электродов. Количество пар электродов варьировалось от 1 до 6, при этом использовались значения ширины 5, 10 и 15 мкм, расстояние между электродами составляло 30 мкм, а толщина слоя металлизации – 1 мкм (рис. 3, 4).

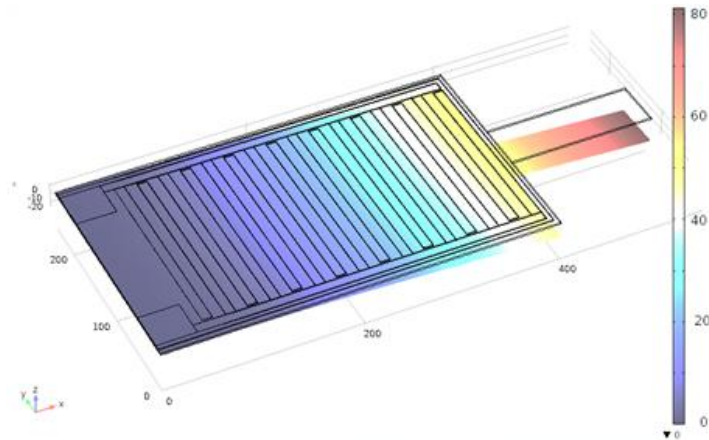


Рис. 3. Отклонения пьезокантилевера, содержащего 8 пар электродов шириной 5 мкм

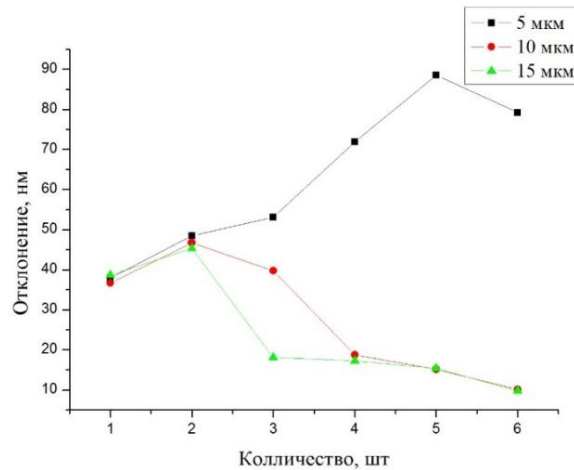


Рис. 4. Зависимость отклонения кантилевера от количества пар электродов

Результаты и обсуждение. Анализ зависимости позволяет отметить, что максимальное значение отклонения наблюдается для пяти пар электродов шириной 5 мкм. Сложную форму зависимости можно объяснить наложением воздействий пьезоэлектрического эффекта и силы упругости конструкции в целом. Так как кремниевое основание и пьезоэлектрический слой оставались без изменений, то вклад в изменение жесткости кантилевера вносила только система электродов. С увеличением числа и ширины электродов растет их жесткость, что приводит к уменьшению отклонения. Однако при использовании малого числа электродов (от 1 до 3 пар) отклоняющее напряжение не в полной мере задействует пьезоэлектрический слой, что приводит к меньшему отклонению. Также при использовании малого числа электродов кантилевер отклоняется менее равномерно, проявляется нежелательный торсионный изгиб. Последний может привести к увеличению погрешности и снизить его срок службы кантилевера. Сравнение равномерности отклонения кантилеверов с различным числом пар электродов приведено на рис. 5.

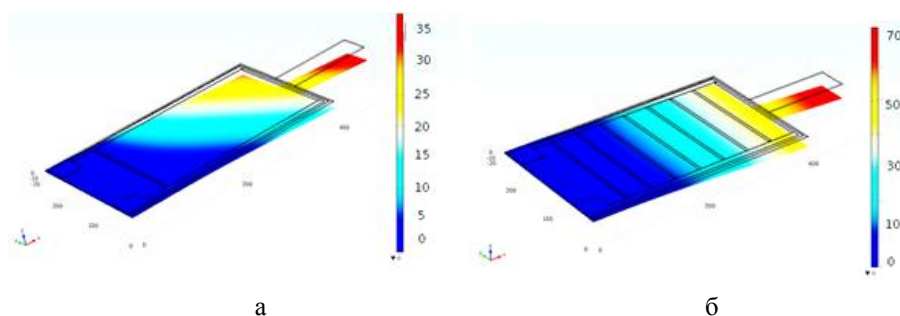


Рис. 5. Отклонение кантилевера с 1 (а) и 5 (б) парами электродов

Выполнено моделирование влияния расположения электродов встречно-штырьевой системы на отклонение для 5 пар электродов. Зазор между электродами в паре варьировался в диапазоне от 5 до 30 мкм, с шагом 5 мкм (рис. 6, 7). Другие характеристики геометрии кантилевера и отклоняющее напряжение оставались неизменными.

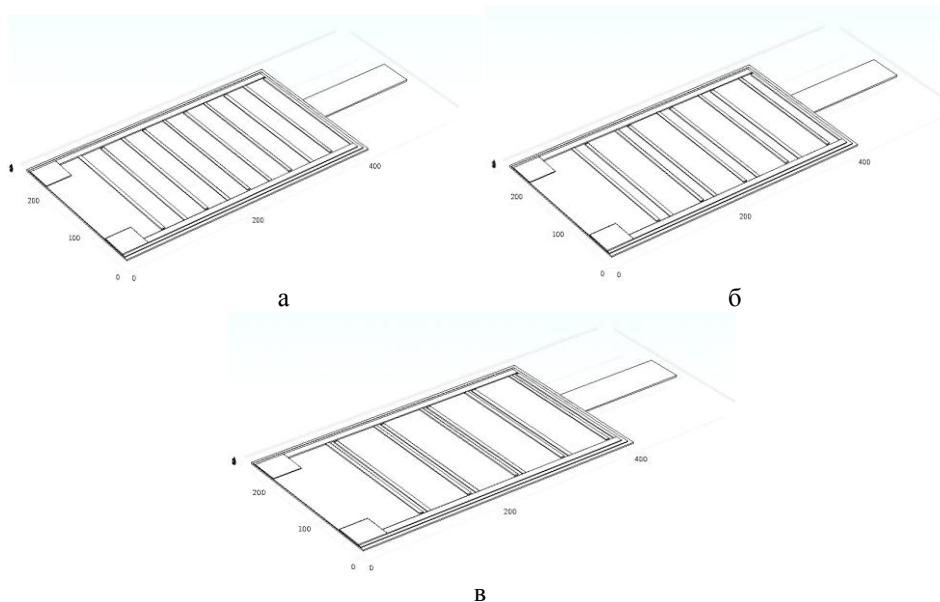


Рис. 6. Расположение электродов на расстоянии: а – 30 мкм; б – 15 мкм и в – 5 мкм

Из рисунка видно, что объединение электродов в пары и уменьшение расстояния между ними приводит к снижению отклонения. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что изначально выбранное равномерное расположение электродов встречно-штырьевой системы является оптимальным.

Также исследовалось влияние толщины и материала электродов на отклонение кантилевера. Результаты для алюминия, титана и никеля приведены на рис. 8. Показательно, что независимо от выбранного металла, толщина электродов более 1 мкм приводит к значительному уменьшению отклонения, в то время как при толщине менее 0,5 мкм увеличение отклонения незначительное.

Учитывая, что в процессе эксплуатации кантилеверы испытывают значительные механические нагрузки, использование металлических электродов тоньше 0,1 мкм нецелесообразно. И, таким образом, диапазон рекомендуемых значений толщины контактно-металлизационной системы составил 0,1-1 мкм, в зависимости от технологии изготовления. Результаты моделирования показали, что выбор материала не вносит принципиального вклада в отклонение кантилевера, и при выборе материала следует уделить должное внимание вопросу адгезии и необходимости обеспечения омического контакта к активному пьезоэлектрическому слою.

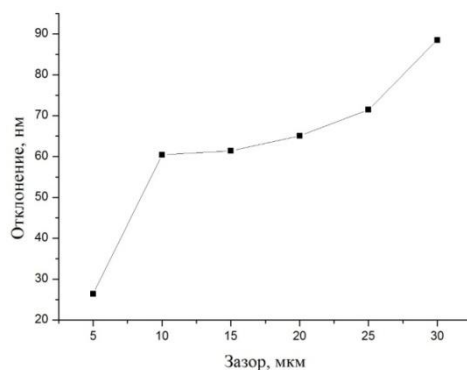


Рис. 7. Зависимость отклонения кантилевера от расстояния между алюминиевыми электродами в паре

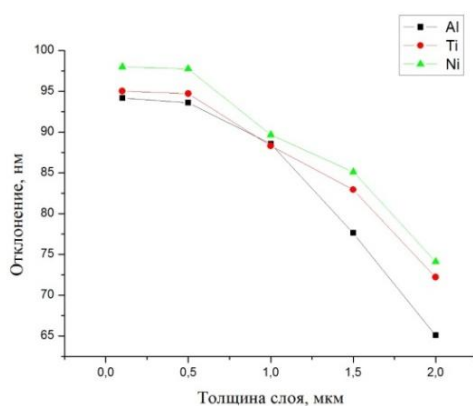


Рис. 8. Зависимости отклонения кантилевера от толщины слоя металлизации

Заключение. В работе представлена модель, позволяющая рассчитывать отклонения пьезоэлектрических кантилеверов прямоугольной формы с различной контактно-металлизационной системой и материалами функциональных слоев. Определено оптимальное количество электродов встречно-штырьевой системы и их расположение на поверхности кантилевера. Проведен анализ влияния толщины и материала металлического слоя на отклонение.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и Научно-образовательного центра "Нанотехнологии" Южного федерального университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.* Atomic force microscope // *Jpn. Phys. Rev. Lett.* – 1986. – Vol. 56, № 9. – P. 930-933.
2. *Maslova N.S., Oreshkin A.I., Panov V.I. et al.* STM evidence of dimensional quantization on the nanometer size surface defects // *Solid State Communications.* – 1995. – Vol. 95, № 8. – P. 507-510.
3. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии. – Н. Новгород: Институт физики микроструктур, 2004. – С. 15-68.
4. *King W.P.* Design analysis of heated atomic force microscope cantilevers for nanotopography measurements // *J. Micromech. Microeng.* – 2005. – Vol. 15. – P. 24-41.
5. *Kim S.-J., Ono T., Esashi M.* Capacitive resonant mass sensor with frequency demodulation detection based on resonant circuit // *Applied Physics Letters.* – 2006. – Vol. 88. – P. 053116.
6. *Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В. и др.* Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: учебное пособие. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – 153 с.
7. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др.* Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / Под ред. *Р.В. Конаковой.* – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008. – 392 с.
8. *Гусев Е.Ю., Гамалеев В.А., Величко Р.В. и др.* Моделирование отклонения пьезокантилевера зондового датчика на основе оксида цинка для атомно-силовой микроскопии // *Физика и технология микро- и наносистем: тезисы докладов XIV научной Молодёжной школы (СПб., 24–25 ноября 2011).* – СПб.: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 2011. – С. 48.
9. *Агеев О.А., Колосийцев А.С., Михайличенко А.В. и др.* Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
10. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А. и др.* Модификация зондов для сканирующей зондовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // *Микроэлектроника.* – 2012. – Т. 41, № 1. – С. 47-56.

REFERENCES

1. *Binnig G., Quate C.F., Gerber Ch.* Atomic force microscope, *Jpn. Phys. Rev. Lett.*, 1986, Vol. 56, No. 9, pp. 930-933.
2. *Maslova N.S., Oreshkin A.I., Panov V.I. et al.* STM evidence of dimensional quantization on the nanometer size surface defects, *Solid State Communications*, 1995, Vol. 95, No. 8, pp. 507-510.
3. *Mironov V.L.* Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Fundamentals of scanning probe microscopy]. Nizhny Novgorod: Institut fiziki mikrostruktur, 2004, pp. 15-68.
4. *King W.P.* Design analysis of heated atomic force microscope cantilevers for nanotopography measurements, *J. Micromech. Microeng.*, 2005, Vol. 15, pp. 24-41.
5. *Kim S.-J., Ono T., Esashi M.* Capacitive resonant mass sensor with frequency demodulation detection based on resonant circuit, *Applied Physics Letters*, 2006, Vol. 88, pp. 053116.
6. *Ageev O.A., Mamikonova V.M., Petrov V.V. i dr.* Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin [Microelectronic transducers non-electrical quantities]: Uchebnoe posobie [Study book]. Taganrog: TRTU, 2000, 153 p.
7. *Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S. i dr.* Fazy vnedreniya v tekhnologii poluprovodnikovyykh priborov i SBIS [The implementation phase in the technology of semiconductor devices and VLSI]. Khar'kov: NTK «Institut monokristallov», 2008, 392 p.
8. *Gusev E.Yu., Gamaleev V.A., Velichko R.V. i dr.* Modelirovanie otkloneniya p'ezokantilevera zondovogo datchika na osnove oksida tsinka dlya atomno-silovoy mikroskopii [Modeling deviations of piezomaterial probe sensor based on zinc oxide for atomic force microscopy], *Fizika i tekhnologiya mikro- i nanosistem: tezisy dokladov XIV nauchnoy Molodezhnoy shkoly (SPb., 24 – 25 noyabrya 2011)* [Physics and technology of micro - and nanosystems: proceedings of the XIV scientific Youth school (St. Petersburg, 24 - 25 November 2011)]. St. Petersburg: Fiziko-tekhnicheskij institut im. A.F. Ioffe RAN, 2011, pp. 48.

9. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Mikhaylichenko A.V. i dr. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanoscale structures based on nanotechnology NANOFAB NTC-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
10. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. i dr. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.

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

Гусев Евгений Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: eyugusev@sfned.ru; 347928, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. «Е»; тел.: +78643371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; доцент.

Гамалеев Владислав Анатольевич – e-mail: vlad.gamaleev@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Михно Александр Сергеевич – e-mail: mikhnoas@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Житяева Юлия Юрьевна – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирантка.

Быков Александр Викторович – Закрытое акционерное общество «Нанотехнология МДТ»; e-mail: bykov@ntmdt.ru; 124482, г. Москва, Зеленоград, корпус 100; тел.: +74997357777; ведущий научный сотрудник.

Gusev Evgeny Yurievich – Southern Federal University; e-mail: eyugusev@sfned.ru; 44, Nekrasovsky, building E, Taganrog, GSP 17A, 347928, Russia; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; associate professor.

Gamaleev Vladislav Anatolyevich – e-mail: vlad.gamaleev@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Mikhno Alexander Sergeevich – e-mail: mikhnoas@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Jityaeva Juliya Yurievna – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Bykov Alexander Victorovich – NT-MDT Co (Molecular Devices and Tools for NanoTehnology); e-mail: bykov@ntmdt.ru; Building 100, Zelenograd, Moscow, 124482, Russia; phone: +74997357777; chief researcher.

УДК 536.416:539.377

А.С. Исаева, Е.А. Рындин

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛЕНОЧНЫХ СЕНСОРАХ*

Рассматривается зависимость между напряженным состоянием нагружаемого объекта мониторинга, представляющего собой алюминиевую пластину, содержащую поверхностный дефект (разрез ненулевой толщины), и напряженным состоянием пленки чувствительного элемента, представляющего собой тонкую пленку меди, нанесенную на пленку полиимида (обес-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты 213.01-11/2014-12 и 14.575.21.0045), а также РФФИ (грант № 13-07-00274).