

**Klimin Viktor Sergeevich** – e-mail: kliminvs@sfnedu.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Rudyk Nikolay Nikolaevich** – e-mail: rudyk0918@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

**Fedotov Alexander Alexandrovich** – e-mail: aafedotov@sfnedu.ru; the department of nanotechnologies and microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Trinh Van Muoi** – e-mail: tvn0209@gmail.com; the department of nanotechnologies and microsystems; postgraduate student.

**Yanenko Vladislav Yurevich** – e-mail: vladikyankenko@me.com; the department of nanotechnologies and microsystems; student.

**Petrov Viktor Vladimirovich** – e-mail: vvpetrov@sfnedu.ru; 22, Chehov street, build A, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371910; Institute of Management in Economic, Ecological and Social Systems; director.

**Nadda Maria Zamirovna** – Societe africaine distribution et d'industrie, Brazzaville, Congo; e-mail: vvp2005@inbox.ru; phone: +78634371767; engineer.

УДК 621.38.049.77

**Е.Ю. Гусев, Ю.Ю. Житяева, А.В. Быков, В.В. Бесполудин**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ\***

*Представлены результаты стимулированного плазмохимического осаждения пленок поликристаллического кремния для создания чувствительных элементов инерционных микро- и наномеханических датчиков. Исследовано влияние технологических параметров процесса, таких как мощность, рабочее давление и температура на свойства получаемых пленок. Показано, что увеличение размера зерна и среднеквадратичного значения (СКЗ) шероховатости происходит с ростом температуры и давления, причем на этой зависимости имеется максимум СКЗ шероховатости при температуре 600 °С. Методами дифракции быстрых электронов и эллипсометрии подтверждена поликристаллическая структура полученных пленок. Методами Холла и Ван-дер-Пау и бесконтактным методом измерены электрофизические параметры поликристаллических пленок после легирования в диффузионной печи. Концентрация, подвижность носителей заряда и удельное и поверхностное сопротивление легированных пленок поликристаллического кремния составили значения  $1,9\text{--}2,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $27,5\text{--}34,1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ ,  $9,35\text{--}9,7 \cdot 10^{-4} \text{ }\Omega\cdot\text{см}$ ;  $2,0 \text{ }\Omega/\square$  (при толщине 300 нм) и  $8,9 \text{ }\Omega/\square$  (при толщине 2,0 мкм), соответственно. Значения микротвердости и модуля Юнга, измеренные методом наноиндентирования на базе атомно-силовой микроскопии, для пленок составили 15–20 ГПа и 150–250 ГПа, соответственно. Выявлены режимы осаждения пленок с характеристиками, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к проводящим и структурным слоям и определяющим их использование для создания микроэлектромеханических систем. Изготовлена серия образцов, содержащих инерционные массы на основе структуры поликристаллический кремний/оксид кремний/подложка кремния – Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si(100). Результаты проведенных исследований могут использоваться при разработке технологических процессов изготовления МЭМС-элементов, в том числе гироскопов и акселерометров.*

*Нанотехнологии; микроэлектромеханические системы; поверхностная микрообработка; плазмостимулированное химическое осаждение из газовой фазы; свойства; поликристаллический кремний.*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.575.21.0045.

**E.Yu. Gusev, J.Y. Jityaeva, Al.V. Bykov, V.V. Bespoludin**  
**RESEARCH OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES**  
**OF POLYCRYSTALLINE SILICON FILMS FOR MEMS STRUCTURES**  
**FORMING**

*This paper presents results of the deposition of polycrystalline silicon films for the formation of inertial sensor elements of MEMS/NEMS. Polysilicon films have been formed by plasma-enhanced chemical vapor deposition. The influence of technological parameters such as power, chamber pressure and temperature on the properties of silicon films has been investigated. The grain size and root-mean square (RMS) roughness increased with the temperature and pressure were shown. However, the RMS roughness has reached maximum at 600 °C with following decreasing. Polycrystalline structure of layers has been confirmed using reflection high-energy electron diffraction and ellipsometry. The electrical parameters of doped films have been measured by contactless and Hall/van der Pauw techniques. Concentration, mobility of charge carrier, resistivity and sheet resistance of doped films were amounted of  $1,9\text{--}2,4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $27,5\text{--}34,1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $9,35\text{--}9,7 \cdot 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$ ;  $2,0 \Omega/\text{sq}$  (film thickness of 300 nm) and  $8,9 \Omega/\text{sq}$  (film thickness of 2  $\mu\text{m}$ ), respectively. The microhardness and Young modulus of obtained films were 15–20 GPa and 150–250 GPa were measured by nanoindentation using atomic force microscopy. Process parameters have been identified for the films with characteristics that are desired and satisfied with the requirements for conducting and structural layers of microelectromechanical systems. The samples of inertial masses based on the polycrystalline silicon / silicon oxide / silicon substrate (poly-Si/SiO<sub>2</sub>/n-type Si(100)) structure have been prepared. The results of the study can be useful for manufacturing processes development and fabrication of MEMS gyroscopes and accelerometers.*

*Nanomaterials; MEMS; surface micromachining; PECVD; properties; polycrystalline silicon.*

**Введение.** В технологии поверхностной микрообработки, применяемой для изготовления разнообразных МЭМС-датчиков, широко используются в качестве конструктивного материала легированные и нелегированные пленки поликристаллического кремния различной толщины [1–6]. Это обусловлено его структурными свойствами и технологичностью [1, 5].

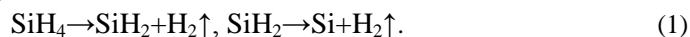
Для получения аморфных, нано- и поликристаллических пленок кремния получили широкое распространение методы плазмохимического осаждения (ПХО) при пониженном давлении и стимулированного высокочастотной плазмой разложения моносилана [4, 5, 7]. Высокая чувствительность кремниевых фаз к параметрам процесса позволяет контролировать их кристалличность, структуру и свойства. Актуальной задачей при этом является управление электрическими и физическими свойствами получаемых пленок. Для микро- и наномеханических инерционных датчиков концентрация носителей заряда в структурных пленках поликристаллического кремния должна быть не менее  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а значения модуля Юнга и микротвердости близки к известным аналитическим данным [1–5]. Это необходимо учитывать на этапе разработки и моделирования конструкций будущего прибора [8].

В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» были разработаны конструкции микромеханических инерционных датчиков с емкостной системой регистрации на основе двух слоев поликристаллического кремния. Проведение материаловедческо-технологических исследований и определение экспериментальных значений параметров и свойств поликристаллического кремния позволит уточнить параметры модели конструкций датчиков [8, 9].

Целью данной работы является исследование механических, структурных и электрических свойств пленок кремния для их применения в элементах микро- и наномеханических систем.

**Методика эксперимента.** В качестве подложки использовали пластины кремния КЭФ (100) n-типа диаметром 100 мм. После очистки пластин [10, 11] проводили плазмохимическое осаждение жертвенного слоя диоксида кремния толщи-

ной 1 мкм в индуктивно-связанной плазме (STE ICPd81, ЗАО «НТО»). Затем методом плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы (PlasmaLab 100 PECVD) на оксиде формировали пленки и слои поликристаллического кремния толщиной 0,3 и 2 мкм [12–14]. Разложение диоксида кремния в потоке аргона протекало по реакции (1) [7]:



Поток газов Ar:SiH<sub>4</sub>=9:1 поддерживали постоянным на уровне 500 см<sup>3</sup>/мин.

Кристаллическую структуру пленок контролировали методом дифракции быстрых электронов (модуль импульсного лазерного осаждения нанотехнологического комплекса с расширенными аналитическими возможностями, ЗАО «НТ-МДТ») [15]. Морфологию и механические свойства (модуль Юнга и микротвердость) исследовали методами атомно-силовой микроскопии (зондовая лаборатория INTEGRA VITA, ЗАО «НТ-МДТ») в полуконтактном режиме и с использованием наноиндентора соответственно [15, 16]. Толщины слоев SiO<sub>2</sub> и Si\* определяли методами растровой электронной микроскопии с использованием фокусированных ионных пучков (Nova NanoLab 600), а также оптической интерферометрии и атомно-силовой микроскопии [15, 17]. Обработку и анализ АСМ-данных проводили с использованием программы Image Analysis 3.5. Проводили исследование влияния параметров осаждения, таких как мощность, температура и рабочее давление на скорость роста пленки и ее свойства.

При наноиндентировании в качестве зонда использовали алмазную трехгранную пирамиду Берковича с углом при вершине 70° [16]. Перемещение по поверхности образца осуществляли с постоянной скоростью и силой нажима 700–900 мкН. При этом синхронно записывали значения нагрузки и соответствующей глубины проникновения зонда в материал; в результате на их основе была построена зависимость.

Пленки поликристаллического кремния толщиной 0,3 и 2 мкм легировали в диффузионной печи (СД.ОМ-3М) с жидким диффузантом РСl<sub>3</sub>. Температура загонки и разгонки поддерживали на уровне 850 и 1150 °С соответственно. Электрические свойства пленок после легирования, такие как концентрация, подвижность носителей заряда и сопротивление, определяли бесконтактным методом, методами Холла и Ван-дер-Пау (LEI 1510M40 и Ecoria HMS-3000/1Т).

В завершении методами контактной литографии и плазмохимического травления через алюминиевую маску на основе полученных структур Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si(100) изготовили инерционные массы с круглыми окнами перфорации на четырех опорах. Удаление жертвенного слоя SiO<sub>2</sub> осуществляли методом жидкостного травления в буферном растворе плавиковой кислоты [18–20].

**Результаты и обсуждение.** Методом плазмохимического осаждения были изготовлены кремниевые пленки с размером кристалла от 40 до 250 нм. Анализ дифракционных изображений показал существование аморфной, нанокристаллической и поликристаллической фазы в структуре пленок [12, 15]. Аморфная пленка была сформирована при температуре от 500 °С до 540–550 °С, нанокристаллические пленки от 550 до 600 и от 700 до 610 °С соответственно. Наличие выше указанных фаз было доказано методом эллипсометрии. Значение показателя преломления составило от 4,5 до 5,0 для аморфной фазы и от 3,5 до 4,0 и от 4,5 до 5,5 для нано- и поликристаллической соответственно.

Влияние температуры на размер зерна и СКЗ шероховатости пленок кремния, показаны на рис. 1. СКЗ достигает максимума при 600 °С и равно 4 нм со следующим уменьшением при установленном рабочем давлении и мощности 1 мм рт. ст. и 40 Вт. Размер зерна увеличивается от 70 до 210 нм при температуре от 550 до 700 °С. Переход от нанокристаллической фазы к поликристаллической наблюдается при 610 °С, что хорошо согласуется с литературными данными [1].

Анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что на температурных зависимостях размера зерна и среднеквадратичной шероховатости имеется перегиб (рис. 2). При этом увеличение давления приводит к росту обоих параметров. Диаметр кристалла и СКЗ шероховатости увеличивается на 6–8 % и 75–80 % соответственно с рабочим давлением от 1 до 2 мм рт.ст. Такое поведение согласуется с данными других авторов [1, 2].

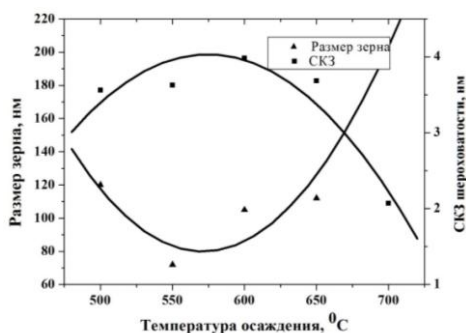


Рис. 1. Зависимость размера зерна и СКЗ шероховатости пленок кремния от температуры осаждения

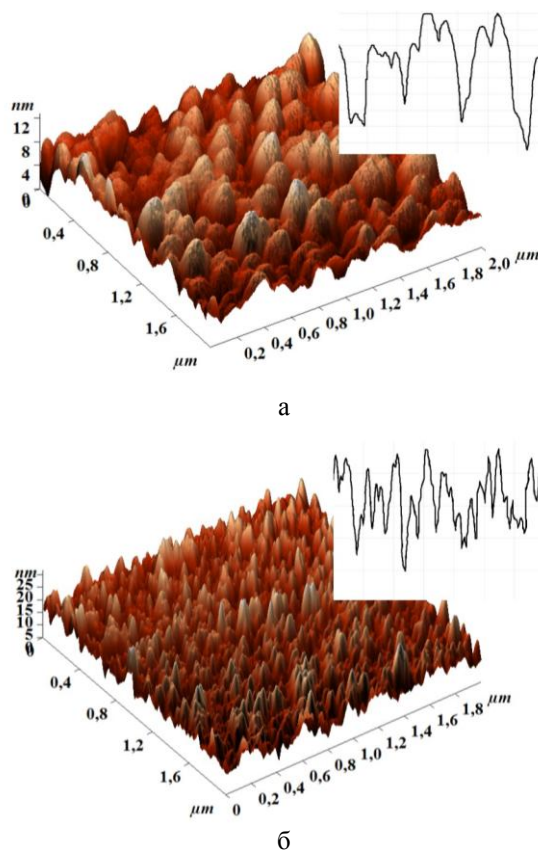


Рис. 2. АСМ-изображение и поперечное сечение поверхности поликристаллической пленки, полученной при 700 (а) и 550 °C (б)

Экспериментальные данные пленок поликремния, осажденных при 700 °С, газом потоке  $\text{SiH}_4:\text{Ar} = 50:450 \text{ см}^3/\text{мин}$  и давлении 1 мм рт.ст., приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Механические свойства пленок поликристаллического кремния**

№	Мощность, Вт	Время, мин	Микротвердость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
1	40	40	16,71±4,76	253,61±55,99
2	40	5	14,66±2,58	217,18±37,36
3	20	5	19,07±2,99	172,18±4,88
4	40	10	18,96±4,34	147,03±58,02
5	20	40	19,33±1,35	170,52±47,31

Образцы 3 и 5 можно считать оптимальными с точки зрения корреляции теоретических и экспериментальных данных.

Концентрацию, подвижность носителей заряда и сопротивление легированных пленок измеряли методами Холла, Ван-дер-Пау и бесконтактным методом. Значения параметров составили  $1,9\text{--}2,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;  $27,5\text{--}34,1 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  и  $9,35\text{--}9,7 \cdot 10^{-4} \Omega\cdot\text{см}$  соответственно. Значение поверхностного сопротивления пленок толщиной 300 нм и 2,0 мкм было 2,0 и 8,9  $\Omega/\square$  соответственно.

На заключительном этапе сформированы инерционные массы из поликристаллического кремния методами контактной фотолитографии и плазмохимического жидкостного травления (рис. 3).

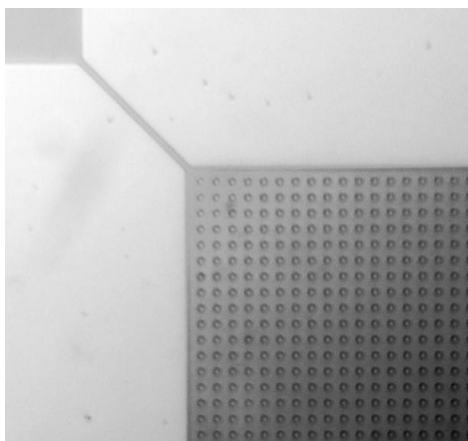


Рис. 3. Оптическое изображение инерционной массы

**Заключение.** В работе методом плазмохимического осаждения получены равномерные пленки поликристаллического кремния на структуре  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  (100). Поликристаллическая структура пленок подтверждена данными дифракции быстрых электронов, эллипсометрии и атомно-силовой микроскопии. Управление морфологией, структурой, механическими свойствами и показателем преломления пленок осуществляли путем изменения ВЧ-мощности, давления в камере и температуры. В зависимости от параметров осаждения размер зерна и СКЗ шероховатости находились в диапазонах 40–250 нм и 1,1–3,5 нм соответственно. По данным наноиндентирования значения микротвердости и модуля Юнга полученных пленок лежали в диапазонах 14,66–19,33 ГПа и 147,03–253,61 ГПа соответственно.

Концентрация, подвижность носителей заряда и удельное сопротивление легированных пленок поликристаллического кремния составили значения  $1,9\text{--}2,4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;  $27,5\text{--}34,1 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  и  $9,35\text{--}9,7 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{см}$ . Значение поверхностного сопротивления пленок толщиной 300 нм и 2,0 мкм было 2,0 и 8,9  $\Omega/\square$  соответственно.

Инерционные массы на основе легированных пленок поликристаллического кремния были изготовлены методом контактной фотолитографии и плазмохимического травления. Механические параметры полученных элементов соответствуют теоретическим значениям. Концентрация носителей заряда  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, полученные пленки удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалам для формирования проводящих инерционных масс микро- и наномеханических акселерометров и гироскопов.

Результаты могут быть использованы при разработке технологических маршрутов и процессов изготовления чувствительных элементов микромеханических гироскопов и акселерометров, кантилеверов и других МЭМС [9, 21].

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and actuators A Physical. – 2002. – Vol. 99. – P. 3-12.
2. Berman D., Krim J. Surface science, MEMS and NEMS: Progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices // Progress in Surface Science. – 2013. – Vol. 88. – P. 171-211.
3. Sniegowski J.J., Boer M.P. IC-Compatible polysilicon surface micromachining // Annual Review of Materials Research. – 2000. – Vol. 30. – P. 299-333.
4. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology. – Heidelberg: Dordrecht: London: New York: Springer, 2010. – 1964 p.
5. Senturia S.D. Microsystem design. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002. – 689 p.
6. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин: Учебное пособие. – Таганрог: ТРТУ, 2000. – 153 с.
7. Perrin J., Leroy O., Bordage M.C. Cross-sections, rate constants and transport coefficients in silane plasma // Contrib. Plasma Phys. – 1996. – Vol. 36. – P. 3-49.
8. Лысенко И.Е. Моделирование двухосевого микромеханического сенсора угловых скоростей и линейных ускорений LR-типа // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 1. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1549> (дата доступа 3.12.2014).
9. 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.
10. Bachman M. RCA-1 Silicon wafer cleaning. URL: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/rca-clean-1.pdf>. (access date 8.10.2014).
11. Kern W. Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology, and applications. – Noyes: William Andrew, 1993. – 623 p.
12. 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.
13. Gusev E. Velichko R. Poly- and nanocrystalline silicon films formation by PECVD for micro- and nanodevices // The International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2012” (ICMNE-2012) (Zvenigorod, 1-5 oct., 2012). – Moscow-Zvenigorod: IPT RAS, 2012. – P. P1-46.
14. Ерошина Ю.Ю., Гамалеев В.А., Гусев Е.Ю. Получение поликристаллических консольных структур методом плазмохимического осаждения // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 146-148.

15. Ageev O.A., Kolomyitsev A.S., Михайличенко А.В., Смирнов В.А., Пташник В.В., Солодовник М.С., Федотов А.А., Замбург Е.Г., Климин В.С., Ильин О.И., Громов А.Л., Рукомойкин А.В. Получение наноразмерных структур на основе нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 1 (114). – С. 109-116.
16. Ageev O.A., Ильин О.И., Колومیцев А.С., Коноплев Б.Г., Рубашкина М.В., Смирнов В.А., Федотов А.А. Разработка методики определения модуля Юнга вертикально ориентированных углеродных нанотрубок методом наноиндентирования // Российские нанотехнологии. – 2012. – Т. 7, № 1-2. – С. 54-59.
17. Коноплев Б.Г., Ageev O.A. Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
18. Гусев Е.Ю., Колومیцев А.С., Житяева Ю.Ю., Гамалеев В.А. Исследование влияния геометрических параметров консольной балки на степень удаления жертвенного слоя // Нанотехнологии в электронике и МЭМС: Международная конференция (Таганрог, 20-25 окт. 2014). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. – С. 91-92.
19. Гусев Е.Ю., Житяева Ю.Ю., Колومیцев А.С., Гамалеев В.А., Коц И.Н., Быков А.В. Исследование режимов жидкостного травления жертвенного слоя SiO<sub>2</sub> для формирования микромеханических структур на основе Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 2 (163). – С. 236-245.
20. Kirt R.W., Muller R.S. Etch rates for micromachining processing // Journal of microelectromechanical systems. – 1996. – Vol. 5, No. 4. – P. 256-269.
21. Урманов Д.М. Концепцией по развитию производства МЭМС-изделий в России на период до 2017 г. URL: [http://www.microsystems.ru/conf\\_news.php?id\\_table=1&file=155.html](http://www.microsystems.ru/conf_news.php?id_table=1&file=155.html) (дата обращения 3.12.2014).

## REFERENCES

1. French P.J. Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensors and actuators A Physical*, 2002, Vol. 99, pp. 3-12.
2. Berman D., Krim J. Surface science, MEMS and NEMS: Progress and opportunities for surface science research performed on, or by, microdevices, *Progress in Surface Science*, 2013, Vol. 88, pp. 171-211.
3. Sniogowski J.J., Boer M.P. IC-Compatible polysilicon surface micromachining, *Annual Review of Materials Research*, 2000, Vol. 30, pp. 299-333.
4. Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology. Heidelberg: Dordrecht: London: New York: Springer, 2010, 1964 p.
5. Senturia S.D. Microsystem design. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002, 689 p.
6. Ageev O.A., Mamikonova V.M., Petrov V.V., Kotov V.N., Negodenko O.N. Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin: Uchebnoe posobie [Microelectronic converters of non-electrical quantities: a Training manual]. Taganrog: TRTU, 2000, 153 p.
7. Perrin J., Leroy O., Bordage M.C. Cross-sections, rate constants and transport coefficients in silane plasma, *Contrib. Plasma Phys.*, 1996, Vol. 36, pp. 3-49.
8. Lysenko I.E. Modelirovanie dvukhosevogo mikromekhanicheskogo sensora uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniiy LR-tipa [Modeling of dual-axis micromechanical sensor of angular soon-scribed and linear accelerations LR-type], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2013, No. 1. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1549> (Accessed 3 December 2014).
9. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nano-tekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.
10. Bachman M. RCA-1 Silicon wafer cleaning. Available at: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/rca-clean-1.pdf>. (Accessed 8 October 2014).
11. Kern W. Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology, and applications. Noyes: William Andrew, 1993, 623 p.

12. 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.
13. Gusev E. Velichko R. Poly- and nanocrystalline silicon films formation by PECVD for micro- and nanodevices, *The International Conference "Micro- and Nanoelectronics – 2012" (ICMNE-2012) (Zvenigorod, 1-5 oct., 2012)*. Moscow-Zvenigorod: IPT RAS, 2012, pp. P1-46.
14. Eroshina Yu.Yu., Gamaleev V.A., Gusev E.Yu. Poluchenie polikristallicheskih konsol'nykh struktur metodom plazmokhimicheskogo osazhdeniya [Obtaining polycrystalline cantilever structures by plasma enhanced chemical vapor deposition], *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroeniya* [Fundamental problems of radioelectronic instrument-making], 2012, Vol. 12, No. 2, pp. 146-148.
15. Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Mikhaylichenko A.V., Smirnov V.A., Ptashnik V.V., Solodovnik M.S., Fedotov A.A., Zamburg E.G., Klimin V.S., Il'in O.I., Gromov A.L., Rukomoykin A.V. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Nanoscale structures' production based on modular nanotechnology platform NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
16. Ageev O.A., Il'in O.I., Kolomiitsev A.S., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Smirnov V.A., Fedotov A.A. Razrabotka metodiki opredeleniya modulya Yunga vertikal'no orientirovannykh uglevodnykh nanotrubok metodom nanoindentirovaniya [Development of a method of determining the young's modulus of vertically designed bathrooms the carbon nanotubes using nanoindentation], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian Nanotechnology], 2012, Vol. 7, No. 1-2, pp. 54-59.
17. Konoplev B.G., Ageev O.A. Eliionnye i zondovye nanotekhnologii dlya mikro- i nanosistemnoy tekhniki [Focused ion beams and probe nanotechnologies for micro- and nanosystem hardware], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 12 (89), pp. 165-175.
18. Gusev E.Yu., Kolomiitsev A.S., Zhityaeva Yu.Yu., Gamaleev V.A. Issledovanie vliyaniya geometricheskikh parametrov konsol'noy balki na stepen' udaleniya zhertvennogo sloya [Study of the influence of geometrical parameters of cantilever on the degree of removal of the sacrificial layer], *Nanotekhnologii v elektronike i MEMS: Mezhdunarodnaya konferentsiya. (Taganrog, 20-25 okt. 2014)* [Nanotechnology in electronics and MEMS: proceedings of the international conference. (Taganrog, 20-25 Oct. 2014)]. Taganrog: Publishing house of SFU, 2014. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2014, pp. 91-92.
19. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Kolomiitsev A.S., Gamaleev V.A., Kots I.N., Bykov A.V. Issledovanie rezhimov zhidkostnogo travleniya zhertvennogo sloya SiO<sub>2</sub> dlya formirovaniya mikromekhanicheskikh struktur na osnove Si\*/SiO<sub>2</sub>/Si [Research of wet SiO<sub>2</sub> sacrificial layer etching for mems structures forming based on POLY-SI\*/SiO<sub>2</sub>/Si], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 2 (163), pp. 236-245.
20. Kirt R.W., Muller R.S. Etch rates for micromachining processing, *Journal of microelectromechanical systems*, 1996, Vol. 5, No. 4, pp. 256-269.
21. Urmanov D.M. Kontseptsiey po razvitiyu proizvodstva MEMS-izdeliy v Rossii na period do 2017 g. [The concept for development of manufacturing MEMS-based products in Russia for the period up to 2017]. Available at: [http://www.microsystems.ru/conf\\_news.php?id\\_table=1&file=155.html](http://www.microsystems.ru/conf_news.php?id_table=1&file=155.html) (Accessed 3 December 2014).

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

**Гусев Евгений Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: euugusev@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

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

**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.



**Бесполудин Владислав Валерьевич** – e-mail: eyugusev@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; студент.

**Gusev Evgeny Yurievich** – Southern Federal University; e-mail: eyugusev@sfned.ru; 2, Shevchenko street, building E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Jityaeva Juliya Yurievna** – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; 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; unit manager.

**Bespoludin Vladislav Valerievich** – e-mail: eyugusev@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; student.

УДК 621.793.14

**С.В. Балакирев, М.М. Еременко, М.С. Солодовник**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО ВЛИЯНИЯ ПОТОКА  
ТЕТРАМЕРОВ МЫШЬЯКА НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ  
GAAS/GAAS(001)\***

*Представлена модель роста GaAs на поверхности GaAs(001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии с учетом влияния потока тетрамеров мышьяка на геометрические параметры массивов зарождающихся островков. Моделирование проводится с помощью кинетического метода Монте-Карло с учетом особенностей поверхности, многокомпонентности растущей пленки и локального окружения адатомов. В связи с большой подвижностью мышьяка на поверхности диффузионный шаг молекулы мышьяка был принят равным средней диффузионной длине, что позволило значительно увеличить скорость вычислений без существенного искажения результатов моделирования. Показано, что островки формируются преимущественно в траншеях (2×4)-реконструированной поверхности GaAs(001) и имеют вытянутую форму вдоль направления [110]. Плотность островков увеличивается с повышением степени заполнения поверхности и достигает значения насыщения. При увеличении потока мышьяка с  $3 \cdot 10^{14}$  до  $4 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> плотность островков увеличивается с  $3,1 \cdot 10^{12}$  до  $4,6 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> при степени заполнения, равной 0,2 монослоя GaAs. При этом средний размер островков уменьшается с 3,6 до 2,5 нм. С увеличением степени заполнения поверхности степень влияния потока мышьяка на средний размер островков возрастает. Функция распределения островков по размерам показывает, что наиболее существенное влияние на характеристики островков оказывает изменение потока тетрамеров мышьяка в области больших значений. Это объясняется дефицитом атомов галлия относительно осажденных молекул мышьяка, что препятствует формированию островков большого размера и приводит к резкому увеличению концентрации малых кластеров. Результаты моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными.*

*Нанотехнологии; наноструктуры; наноматериалы; полупроводники; молекулярно-лучевая эпитаксия; арсенид галлия; поток мышьяка; кинетическое моделирование; метод Монте-Карло.*

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10006).