

**Саламатов Евгений Иванович** – e-mail: salam@otf.fti.udmurtia.su; тел.: +73412216933; отдел теоретической физики; г.н.с.; д.ф.-м.н.

**Коньгин Григорий Николаевич** – e-mail: gnkon@mail.ru; тел.: +73412728775; лаб. механоактивации органических систем; зав. лаб.; к.ф.-м.н.

**Гончаров Олег Юрьевич** – e-mail: olaf@fti.udm.ru; тел.: +73412721436; отдел структурно-фазовых превращений; с.н.с.; к.х.н.

**Гильмутдинов Фаат Залалутдинович** – e-mail: lasas@ftiudm.ru; тел.: +73412431573; отдел физики и химии поверхности; зав. отделом; к.ф.-м.н.

**Karban Oksana Vladislavovna** – Physical-Technical Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: ocsa123@yahoo.com; 132, Kirova street, Izhevsk, 426000, Russia; phone: +79225056346; the department of structural-phase transformation; senior researcher; dr. of phys.-math. sc.

**Salamator Evgeny Ivanovich** – e-mail: salam@otf.fti.udmurtia.su; phone: +73412216933; the department of theoretical physics; chief researcher; dr. of phys.-math. sc.

**Konigin Grigoriy Nikolaevich** – e-mail: gnkon@mail.ru; phone: +73412728775; mechanoactivation organic systems laboratory; head of laboratory; cand. of phys.-math. sc.

**Goncharov Oleg Yurievich** – e-mail: olaf@fti.udm.ru, phone: +73412721436; the department of structural-phase transformation; senior researcher; cand. of chem. sc.

**Gilmutdinov Faat Zalalutdinovich** – e-mail: lasas@ftiudm.ru; phone: +73412431573; the department of surface physics and chemistry; head of department; cand. of phys.-math. sc.

УДК 621.38.049.77

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-5264

**Е.Ю. Гусев**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ МЕТОДАМИ  
ПОВЕРХНОСТНОЙ МИКРООБРАБОТКИ**

*Целью работы является разработка технологического маршрута изготовления интегрального многоосевого микромеханического акселерометра с использованием плазменных методов технологии поверхностной микрообработки в лаборатории плазменных нанотехнологий научно-образовательного центра «Нанотехнологии» с использованием оборудования центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета. Представлены результаты разработки. Маршрут включает около 20 основных технологических операций (очистки подложки, плазменного осаждения нитрида кремния, поликристаллического кремния и оксида кремния, их плазменного травления, жидкостного травления оксида кремния, легирования поликристаллического кремния, напыления контактно-металлизационной системы и её термический отжиг, а также контактной фотолитографии), в том числе 5 фотолитографий с использованием комплекта из 5 фотошаблонов с минимальным размером элементов 1 мкм. По отдельным технологическим операциям представлены результаты экспериментальных исследований, приводятся рекомендации. В соответствии с разработанным маршрутом изготовлена серия образцов микромеханических акселерометров на основе поликристаллического кремния. Для поликристаллического кремния, полученного плазмохимическим осаждением с последующим ex-situ легированием диффузией фосфора, с размером зерна 40–250 нм и средним квадратичным значением шероховатости 1,1–3,5 нм, значения концентрации носителей заряда, подвижности и поверхностного сопротивления составили  $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sim 30 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и*

2–9 Ом/□; микротвердость и модуль упругости находились в диапазонах 14–20 ГПа и 150–250 ГПа, соответственно. Вопросы проектирования конструкции акселерометра, разработки фотошаблонов, а также операций посадки кристалла в корпус, разварки выводов и корпусирования в работе не затрагиваются. Результаты проведенных исследований могут использоваться при разработке технологических маршрутов изготовления микро-механических гироскопов и акселерометров и других микроэлектромеханических устройств, а также устройств наносистемной техники.

*Нанотехнологии; микроэлектромеханические системы; поверхностная микрообработка; технологический маршрут; технологические операции; поликристаллический кремний.*

**E.Yu. Gusev**

**DEVELOPMENT OF FABRICATION TECHNOLOGY  
OF POLYCRYSTALLINE SILICON MICROMECHANICAL  
ACCELEROMETER BY SURFACE MICROMACHINING**

*This goal is to develop a process flow of fabrication of integral multi-axis micromechanical accelerometer using surface micromachining at research and educational center “Nanotechnologies” and its multiple-access computing center at Southern Federal University. The paper presents the results of development. The process flow contains over 20 primary operations (substrate cleaning, plasma deposition of silicon nitride, polycrystalline silicon and silicon oxide, its plasma etching, wet etching of silicon oxide, polysilicon doping, deposition of contacts and its thermal annealing, as well as photolithography), including 5 lithography steps using 5 masks with minimum features size of 1 micron. The experimental results and recommendations are presented for selected processing steps. For polysilicon deposited and ex-situ doped with grain size and RMS roughness of 40–250 nm and 1.1–3.5 nm, the concentration, mobility of carriers and sheet resistance of  $2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,  $30 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  and  $2\text{--}9 \text{ }\Omega/\square$  were obtained. The microhardness and young modulus were 14–20 GPa and 150–250 GPa, respectively. Questions of accelerometer design, masks development and packaging are not affected. The results of the work can be used for process flow developments of micromechanical gyroscopes, accelerometers and MEMS&NEMS devices.*

*Nanotechnology; MEMS; surface micromachining; process flow; technological steps; polycrystalline silicon.*

**Введение.** Интеграция микромеханических компонентов с микроэлектронными компонентами привела к появлению новой технологии – технологии микро(электро)механических систем (МЭМС) или технологии микрообработки. Используя стандартные процессы технологии интегральных схем [1–4] успешно изготовлены миниатюрные микромеханические компоненты, такие как мембраны, приводы и шестерни, насосы и вентили [1, 5–7]. Разработка и развитие технологии объемной и поверхностной микрообработки, технологии высокоаспектных структур и наноструктур (наномеханики) позволили получить микро- и наномеханические сенсоры и датчики (гироскопы и акселерометры), а также расширить области их применения от бытовых приборов до высокотехнологических аэрокосмических приложений [6]. В последнем случае основными требованиями, предъявляемыми к таким устройствам, являются – возможность регистрации характеристик по нескольким осям чувствительности, малые масса габаритные размеры.

Известные микромеханические сенсоры позволяют измерять характеристики, например, линейного ускорения, по одной или двум осям чувствительности. Выполнение требования многоосевой чувствительности приводит к необходимости использования операций микроскопии с последующей трудоёмкой прецизионной юстировкой, или увеличению габаритных размеров при расположении нескольких сенсоров с различным направлением осей на одной подложке или кристалле.

Причём изготовлены они не всегда методами групповых (промышленных) технологий. Локальность таких методов (например, фокусированных ионных пучков и зондовой нанолитографии [8–12] и др.), несмотря на достигнутое улучшение функциональных возможностей датчиков, ограничивает область их использования уровнем лабораторных разработок [6].

Решением обозначенной проблемы стала разработка интегральных многоосевых сенсоров и технологий их изготовления методами поверхностной микрообработки [13, 14]. При этом основным материалом таких устройств остается поликристаллический кремний в силу его структурных и электрофизических свойств, а также технологичности [5–7].

В рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» была разработана конструкция трёхосевого микромеханического акселерометра (ММА) с емкостной системой регистрации на основе двух слоёв поликристаллического кремния [14, 15]. Целью данной работы является разработка и реализация технологического маршрута изготовления многоосевого микромеханического акселерометра на основе поликристаллического кремния по технологии поверхностной микрообработки с использованием плазменных методов на базе лаборатории плазменных нанотехнологий НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ [16, 17].

**Методика экспериментов.** Для разработанной конструкции трёхосевого микромеханического акселерометра [14, 15] предложен типовой технологический маршрут (рис. 1) [18, 19]. Проведены предварительные исследования режимов плазменного нанесения материалов, плазменного и жидкостного травления и снятия, в том числе плазменного доснятия фоторезистов [20–23]. Исследованы электрофизические и механические свойства и характеристики получаемых плёнок [24–27]. Анализ результатов таких экспериментальных исследований позволил уточнить конструкторско-технологическое решение многоосевого микроакселерометра [14, 15], разработать комплект фотошаблонов и технологический маршрут его изготовления с минимальным размером элементов равным 1 мкм. В соответствии с разработанным маршрутом изготовлена партия экспериментальных образцов многоосевых микромеханических акселерометров.



Рис. 1. Технологический маршрут изготовления ММА на пластине

**Результаты и их обсуждение.** Результаты первичных материаловедческо-технологических исследований позволили подобрать режимы, которые обеспечили требуемые значения толщин слоёв (например, рис. 2, 3) [20–22], латеральных размеров элементов структуры при литографии, технологичность нанесения и удаления фоторезистов и жертвенного слоя [23], получение структурного слоя с подходящими электрофизическими и механическими свойствами [24–27]. В частности, для поликристаллического кремния, полученного плазмохимическим осаждением, с последующим ex-situ легированием диффузией фосфора, значения концентрации носителей заряда, подвижности и поверхностного сопротивления составили  $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $\sim 30 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и  $2\text{--}9 \text{ Ом}/\square$ , при этом микротвердостью и модулем упругости можно управлять в диапазоне  $14\text{--}20 \text{ ГПа}$  и  $150\text{--}250 \text{ ГПа}$ , соответственно [25, 26]. Определённые экспериментальные значения параметров и свойств поликристаллического кремния позволили уточнить параметры модели конструкции микроакселерометра [14, 15].

На основе результатов предварительных исследований для уточнённой конструкции был разработан комплект фотошаблонов, выполнены уточнения типового технологического маршрута поверхностной микрообработки и разработан настоящий технологический маршрут изготовления многоосевого микроакселерометра. Маршрут, с учётом оснащения НОЦ и ЦКП «Нанотехнологии» ЮФУ [16, 17, 28], включает следующие операции (рис. 4):

1. Очистка подложки 1 – пластины кремния КЭФ (100) n-типа диаметром 100 мм штатным методом [29, 30].

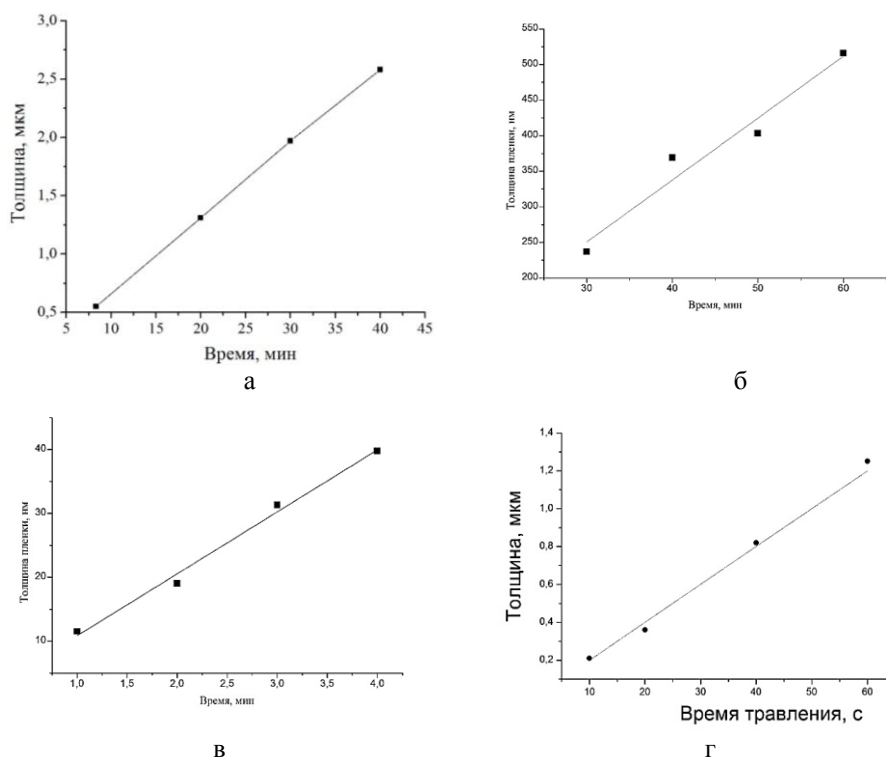


Рис. 2. Временные зависимости толщины: а – поликристаллического кремния; б – титана; в – никеля при осаждении; г – величины подтравки оксида кремния при жидкостном удалении

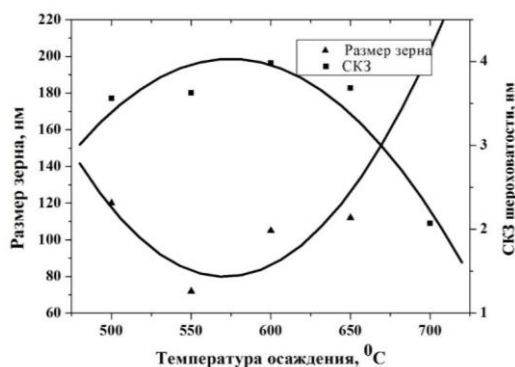


Рис. 3. Зависимость размера зерна и СКЗ шероховатости плёнок кремния от температуры осаждения

2. Нанесение изолирующего слоя нитрида кремния 2 методом плазмохимического осаждения (STE ICPd81).

3. Нанесение слоя поликристаллического кремния (PlasmaLab 100 PECVD).

4. Легирование слоя поликристаллического кремния методом термической диффузии из жидкостного источника  $PCl_3$  (СД.ОМ-3)

5. 1-ая фотолитография (SUSS MJB4) – формирование неподвижных электродов емкостных преобразователей перемещений 3 и проводящих областей плазмохимическим травлением (STE ICPe68, YES-CV200 RFS).

6. Нанесение жертвенного слоя (диоксид кремния) методом плазмохимического осаждения (STE ICPd81).

7. 2-ая фотолитография – вскрытие окон под области опор упругого подвеса инерционной массы и якорных областей электростатических актюаторов и емкостных преобразователей перемещений 4 плазмохимическим травлением.

8. Формирование предохранителей с целью снижения вероятности прилипания структурного слоя к подложке путем травления жертвенного слоя (не показано на рис. 4).

9. Нанесение структурного слоя поликристаллического кремния методом стимулированного плазмохимического осаждения 5,а.

10. Легирование слоя поликристаллического кремния методом термической диффузии из жидкостного источника  $PCl_3$ .

11. Нанесение при необходимости дополнительного слоя поликристаллического кремния методом стимулированного плазмохимического осаждения 5,б.

12. 3-ья фотолитография – формирование топологии структурного слоя микромеханического устройства 6 плазмохимическим травлением.

13. 4-ая фотолитография – вскрытие окон в жертвенном слое под контактные площадки 7 плазмохимическим или жидкостным травлением.

14. 5-ая обратная фотолитография (начало) – задание топологии областей для металлизации контактных площадок.

15. Нанесение слоя Ti/Ni (Auto 500) методом магнетронного распыления или электронно-лучевого напыления.

16. 5-ая обратная литография (окончание) – формирование контактных площадок мокрой химией с ассистированием ультразвуком (Amerimade)

17. Термический отжиг контактно-металлизационной системы (STE RTA 70H).

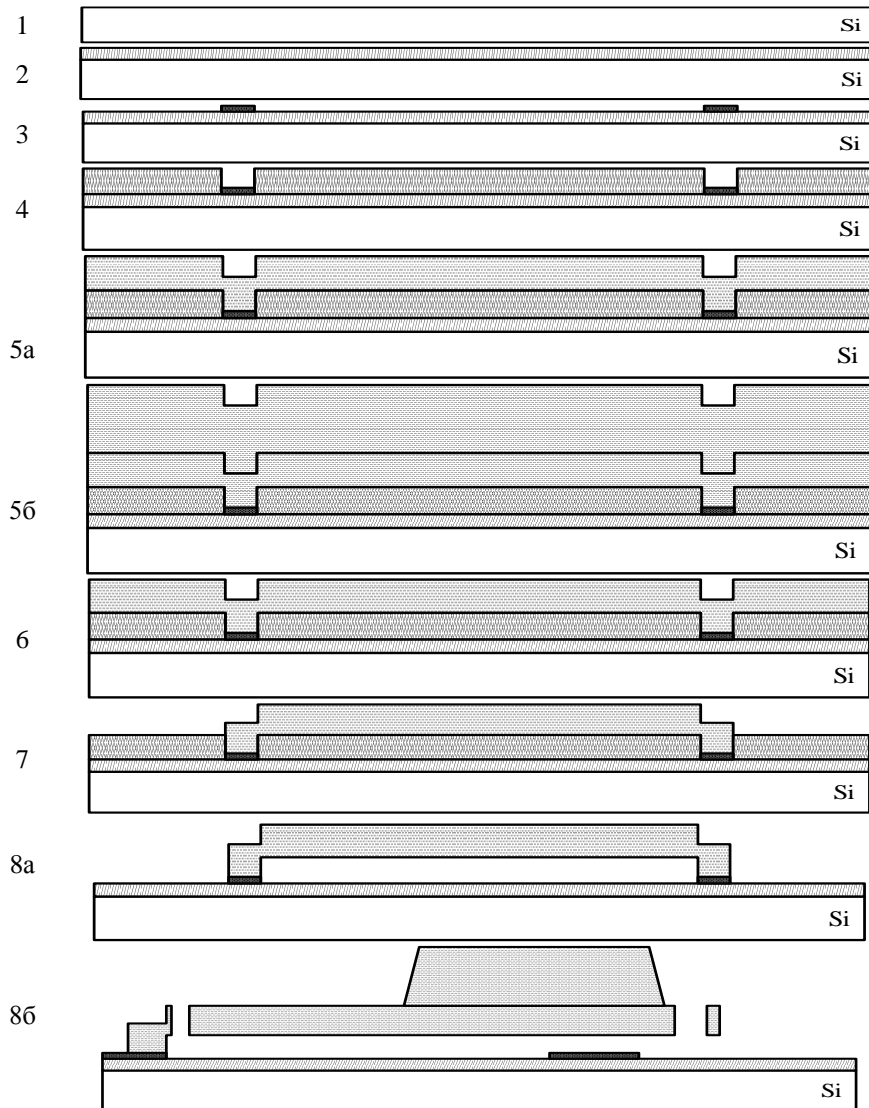


Рис. 4. Поперечные сечения структуры MMA (пояснения позиций в тексте)

18. Удаление жертвенного слоя (освобождение структурного слоя) жидкостным химическим травлением, а также с использованием сухого плазмохимического травления – формирование итоговой структуры микромеханического акселерометра 8.

19. Скрайбирование на кристаллы (Алмаз-М) и их последующее корпусирование при требуемых условиях.

По представленному маршруту необходимо дать следующие разъяснения. Шаблон №3 должен содержать матрицы светлых полей, рисунок которых наследуется структурным слоем в виде окон «перфорации» (12), облегчающих освобождение структурного слоя на этапе жертвенного травления (18). Дополнительный слой (операция 11) наносится при необходимости увеличения веса инерционной массы. Далее, при удалении жертвенного слоя, вероятно «слипание» и удержание

инерционных масс и других элементов микромеханического устройства с нижележащими слоями за счет сил поверхностного натяжения и др. Для невилирования данного эффекта служат охранные области (операция 8). Также важно отметить, что операции по нанесению проводящих нижнего и структурного слоёв и операции последующего легирования могут проводиться одновременно (in-situ), например, при наличии газовой линии с источником донорной или акцепторной примеси (фосфин или диборан). Технологичность выполнения операции обратной литографии (16) повышается при переходе от конформных металлических слоёв, характерных магнетронному распылению, к неконформным, получаемым методом электронно-лучевого напыления. При наличии требований по минимальному размеру элементов менее 1 мкм для обеспечения требуемого разрешения, как известно, следует уменьшать длину волны источника экспонирования. Также этому способствует переход от плазмохимического травления к глубокому реактивного ионному травлению, для которого характерен отвесный профиль боковых стенок.

Характерные значения (диапазоны) толщин каждого слоя, отвечающие требованиям конструкции, отвечающей функциональным параметрам и характеристикам микромеханического акселерометра, сведены в таблице.

Реализация настоящего технологического маршрута позволила изготовить партию многоосевых микромеханических акселерометров (рис. 5), отправленную на испытания.

Важно подчеркнуть, что технологичность предложенного маршрута допускает изготовление нескольких типов устройств (многоосевые акселерометры и гироскопы) в едином технологическом цикле при соответствующей проработке рисунков фотошаблонов.

**Заключение.** Представлены результаты отработки режимов отдельных технологических операций, а также приводятся ссылки на публикации с полученными ранее результатами, в том числе по проектированию конструкции – основанию для настоящей разработки. Описан разработанный технологический маршрут изготовления многоосевого микромеханического акселерометра по технологии поверхностной микрообработки с использованием плазменных методов для реализации в условиях лаборатории плазменных нанотехнологий НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ. Маршрут включает около 20 основных технологических операций, в том числе 5 фотолитографий с использованием комплекта из пяти фотошаблонов с минимальным размером элементов 1 мкм. Предложены рекомендации по отдельным операциям. В соответствии с настоящим маршрутом изготовлена партия многоосевых микромеханических акселерометров на основе поликристаллического кремния, отправленных на испытания.

Таблица

**Перечень технологических операций изготовления ММА**

№ п/п	Название операции	Метод	Материал	Толщина, мкм
1	Предварительная очистка подложки	Жидкостная химическая очистка	Si	x
2	Нанесение изолирующего слоя	Плазмохимического осаждение из газовой фазы	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0,6
3	Нанесение проводящего слоя	Плазмохимическое осаждение из газовой фазы	Si*	0,4-0,5

Окончание табл.

№ п/п	Название операции	Метод	Материал	Толщина, мкм
4	Формирование структуры: - фотолитография;	Контактная	x	x
	- удаление материала;	Жидкостное травление	SiO <sub>2</sub> , Si*	1,0-1,5 1,5-2,0 (до 6,5)
		Плазмохимическое (реактивно-ионное) травление	Si*	1,5-2,0
5	Нанесение жертвенного слоя	Плазмохимическое осаждение в индуктивно-связанной плазме	SiO <sub>2</sub>	1,0-1,5
6	Формирование предохранителей	Химическое травление	SiO <sub>2</sub>	≥0,1
7	Нанесение структурного слоя	Плазмохимическое осаждение из газовой фазы	Si*	1,5-2,0 (до 6,5)
8	Нанесение металлизации на контактные площадки	Магнетронное распыление	Ti, Ni	0,3-0,5
		Электронно-лучевое напыление		
9	Отжиг контактно-металлизационной системы	Быстрый термический отжиг	Ti, Ni	x

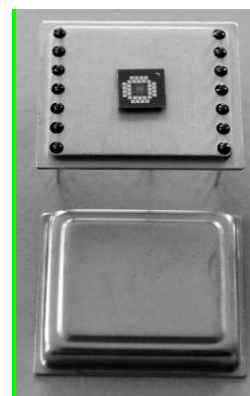
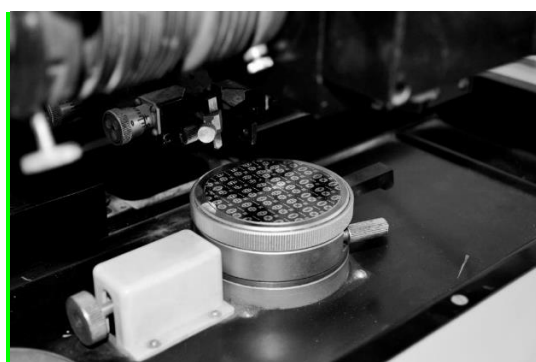


Рис. 5. Оптическое изображение пластины со структурами MMA при скрайбировании (слева) и кристалла MMA перед разваркой (справа)

Результаты могут быть использованы при разработке технологий изготовления многоосевых микромеханических акселерометров и гироскопов, наномеханических акселерометров, кантилеверов и других МЭМС.



Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения №14.575.21.0045 (уникальный идентификатор RFMEFI57514X0045). Результаты получены с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sniegowski J.J., Boer M.P.* IC-Compatible polysilicon surface micromachining // Annual Review of Materials Research. –2000. – Vol. 30. – P. 299-333.
2. *Агеев О.А., Достанко А.П., Толочко Н.К., Бордусов С.В.* Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии. – Мн.: Бестпринт, 2005. – 682 с.
3. *Сеченов Д.А., Касимов Ф.Д., Агаев Ф.Г., Светличный А.М., Агеев О.А.* Активируемые процессы микроэлектронной технологии. – Баку: Изд-во ЭЛМ, 2000. – 258 с.
4. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Конакова Р.В., Миленин В.В., Пилипенко В.А.* Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС. – Х.: НТК «Институт монокристаллов», 2008. – 392 с.
5. *Maboudian R.* Surface processes in MEMS technology // Surface Science Reports. – 1998. – Vol. 30. – P. 207-269.
6. *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.
7. *French P.J.* Polysilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and actuators A Physical. – 2002. – Vol. 99. – P. 3-12.
8. *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. – P. 89-92.
9. *Коноплев Б.Г., Агеев О.А., Смирнов В.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И.* Модификация зондовых датчиков-кантиллеров для атомно-силовой микроскопии методом фокусированных ионных пучков // Нано- и микросистемная техника. – 2011. – № 4. – С. 4-8.
10. *Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Vykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N.* Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam // Microelectronics Reliability. – 2015. – Vol. 55, Is. 9-10. – P. 2131-2134.
11. *Авилов В.И., Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Коноплев Б.Г., Поляков В.В., Смирнов В.А., Цуканова О.Г.* Моделирование процесса формирования оксидных наноразмерных структур методом локального анодного окисления поверхности металла // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 88-93.
12. *Агеев О.А., Сюрик Ю.В., Климин В.С., Федотов А.А.* Получение нанокompозитных полимерных материалов, модифицированных углеродными наноструктурами, на основе НАНОФАБ НТК-9 // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 135-142.
13. *Senturia S.D.* Microsystem design. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002. – 689 p.
14. Пат. 2597950 РФ № 2015124221/28. Интегральный микромеханический гироскоп-акселерометр / *Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е., Ежова О.А.*; заявл. 22.06.15; опубл. 20.09.16, Бюл. № 26.
15. *Лысенко И.Е., Ежова О.А.* Исследование влияния параметров элементов подвесов на собственную частоту конструкции микромеханического сенсора линейных ускорений // Нано- и микросистемная техника. – 2016. – № 6. – С. 386-390.
16. *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.
17. *Агеев О.А., Быков В.А.* Технологическое оборудование для создания наносистемной техники // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2010. – № 5. – С. 68-70.

18. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Zhit'yeva Yu.Yu., Bykov Al.V., Bessoludn V.V. Разработка унифицированной технологии изготовления поликремниевых микромеханических гироскопов и акселерометров // Сотрудничество стран БРИКС для устойчивого развития: Материалы международной конференции молодых ученых стран БРИКС (Ростов-на-Дону, 24-26 сентября 2015 г.): в 2 т. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 67-70.
19. Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov Al.V., Gusev E.Yu. [et al.]. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices // Chapter In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. – Parinov, I.A., Chang, Sh.-H., Topolov, V.Yu. (Eds.). – London: Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 563-580.
20. Величко P.B., Гусев E.Ю., Гамалеев B.A., Михно A.C., Бычкова A.C. Исследование режимов плазмохимического осаждения пленок нано- и поликристаллического кремния // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11. – С. 1176-1179.
21. Ерошина Ю.Ю., Гамалеев B.A., Гусев E.Ю. Получение поликристаллических консольных структур методом плазмохимического осаждения // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 146-148.
22. Гусев E.Ю., Житяева Ю.Ю., Быков A.B., Рудык H.H. Оптимизация конструкции инерционной массы микромеханического инерционного датчика, изготовленной с использованием жидкостного травления // Материалы VII Международной научной-технической конференции «Микро- и нанотехнологии в электронике». – 2015. – С. 326-328.
23. Гусев E.Ю., Житяева Ю.Ю., Коломийцев A.C., Гамалеев B.A., Коц И.Н., Быков A.B. 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.
24. Гусев E.Ю., Житяева Ю.Ю., Быков A.B., Бессолудин B.V. Исследование электрофизических свойств пленок поликристаллического кремния для создания микроэлектромеханических систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 9 (170). – С. 126-134.
25. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Yu., Kolomyitsev A.S., Bykov Al.V. Fabrication of polycrystalline silicon elements for micro- and nanomechanical accelerometers. Chapter In: Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering. – Hong, Seo & Moon (Eds.). – London: Taylor & Francis Group: CRC Press: Balkema, 2016. – P. 13-16.
26. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ilina M.V., Bykov Al.V. Grain size and doping effect on structure and electromechanical properties of polycrystalline silicon for MEMS applications // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 741. – P. 012001.
27. Ageev O.A., Коноплев B.Г., Рубаишкина M.B., Рукомошкин A.B., Смирнов B.A., Солодовник M.C. Исследование влияния на модуль Юнга геометрических параметров ориентированных нитевидных нанокристаллов GaAs методом атомно-силовой микроскопии // Российские нанотехнологии. – 2013. – Т. 8, № 1-2. – С. 27-32.
28. Достанко A.П., Аваков C.M., Ageev O.A. [и др.]. Технологические комплексы интегрированных процессов производства изделий электроники. – Мн.: Белорусская наука, 2016. – 251 с.
29. Bachman M. RCA-1 Silicon wafer cleaning [Electronic resource]. – URL: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/rca-clean-1.pdf>. (access date 8.10.2014).
30. Kern W. Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology, and applications. – Noyes: William Andrew, 1993. – 623 p.

## REFERENCES

1. Snięowski J.J., Boer M.P. IC-Compatible polysilicon surface micromachining, *Annual Review of Materials Research*, 2000, Vol. 30, pp. 299-333.
2. Ageev O.A., Dostanko A.P., Tolochko N.K., Bordusov S.V. Intensifikatsiya protsessov formirovaniya tverdotel'nykh struktur kontsentririvannymi potokami energii [Intensification of processes of formation of solid structures by the concentrated streams of energy]. Minsk: Bestprint, 2005, 682 p.

3. *Sechenov D.A., Kasimov F.D., Agaev F.G., Svetlichnyy A.M., Ageev O.A.* Aktiviruemye protsessy mikroelektronnoy tekhnologii [Activated processes in microelectronic technology]. Baku: Izd-vo ELM, 2000, 258 p.
4. *Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S., Konakova R.V., Milenin V.V., Pilipenko V.A.* 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.
5. *Maboudian R.* Surface processes in MEMS technology, *Surface Science Reports*, 1998, Vol. 30, pp. 207-269.
6. *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.
7. *French P.J.* Polysilicon: a versatile material for Microsystems, *Sensors and actuators A Physical*, 2002, Vol. 99, pp. 3-12.
8. *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.
9. *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 technology], 2011, No. 4, pp. 4-8.
10. *Ageev O.A., Kolomiitsev A.S., Bykov A.V., Smirnov V.A., Kots I.N.* Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam, *Microelectronics Reliability*, 2015, Vol. 55, Is. 9-10, pp. 2131-2134.
11. *Avilov V.I., Ageev O.A., Blinov Yu.F., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A., Tsukanova O.G.* Modelirovanie protsessa formirovaniya oksidnykh nanorazmernykh struktur metodom lokal'nogo anodnogo okisleniya poverkhnosti metalla [Modeling of the process of forming the oxide nano structures by the local anodic oxidation of metal surface], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2015, Vol. 85, No. 5, pp. 88-93.
12. *Ageev O.A., Syurik Yu.V., Klimin V.S., Fedotov A.A.* Poluchenie nanokompozitnykh polimernykh materialov, modifitsirovannykh uglerodnymi nanostrukturami, na osnove NANOFAB NTK-9 [Production of nanocompound polymeric materials based on multifunctional modular nanotechnological platform NANOFAB NTK-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 135-142.
13. *Senturia S.D.* Microsystem design. Kluwer academic publishers: New York: Boston: Dordrecht: London: Moscow, 2002, 689 p.
14. *Konoplev B.G., Lysenko I.E., Ezhova O.A.* Integral'nyy mikromekhanicheskiy giroskop-akselerometr [Integrated micromechanical gyroscope-accelerometer]. Patent 2597950 RF No. 2015124221/28; stated 22.06.15; published 20.09.16, bull. No. 26.
15. *Lysenko I.E., Ezhova O.A.* Issledovanie vliyaniya parametrov elementov podvesov na sobstvennuyu chastotu konstruksii mikromekhanicheskogo sensora lineynykh uskoreniy [Research of influence of parameters of elements of the suspensions on the natural frequency design of micromechanical linear acceleration sensor], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2016, No. 6, pp. 386-390.
16. *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.
17. *Ageev O.A., Bykov V.A.* Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya sozdaniya nanosistemnoy tekhniki [Technological equipment for the creation of nanosystem technology], *Nanotekhnologii. Ekologiya. Proizvodstvo* [Nanotechnology. Ecology. Production], 2010, No. 5, pp. 68-70.

18. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Bykov A.V., Bespoludin V.V. Razrabotka unifikirovannoy tekhnologii izgotovleniya polikremnievykh mikromekhanicheskikh giroskopov i akselerometrov [The development of standardized technologies of manufacturing polysilicon micromechanical gyros and accelerometers], *Sotrudnichestvo stran BRIKS dlya ustoychivogo razvitiya: Materialy mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh stran BRIKS (Rostov-na-Donu, 24-26 sentyabrya 2015 g.)* [BRICS Cooperation for sustainable development: proceedings of the international conference of young scientists in the BRICS countries (Rostov-on-Don, September 24-26, 2015)]: in 2 vol. 2. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 67-70.
19. Ageev O.A., Balakirev S.V., Bykov A.V., Gusev E.Yu. [et al.]. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices, *Chapter In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Parinov, I.A., Chang, Sh.-H., Topolov, V.Yu. (Eds.)*. London: Springer International Publishing Switzerland, 2016, pp. 563-580.
20. 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.
21. Eroshina Yu.Yu., Gamaleev V.A., Gusev E.Yu. Poluchenie polikristallicheskikh konsol'nykh struktur metodom plazmokhimicheskogo osazhdeniya [Obtaining a polycrystalline cantilever structures by plasma deposition of], *Fundamental'nye problemy radioelektronogo priborostroeniya* [Fundamental problems of Radioelectronics instrument-making], 2012, Vol. 12, No. 2, pp. 146-148.
22. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Bykov A.V., Rudyk N.N. Optimizatsiya konstruksii inertsionnoy massy mikromekhanicheskogo inertsionnogo datchika, izgotovlennoy s ispol'zovaniem zhidkostnogo travleniya [Design optimization of inertial mass of a micromechanical inertial sensor fabricated using the liquid etching ], *Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Mikro- i nanotekhnologii v elektronike»* [Materials of VII International scientific-technical conference "Micro- and nanotechnologies in electronics"], 2015, pp. 326-328.
23. 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.
24. Gusev E.Yu., Zhityaeva Yu.Yu., Bykov A.V., Bespoludin V.V. Issledovanie elektrofizicheskikh svoystv plenok polikristallicheskogo kremniya dlya sozdaniya mikroelektromekha-nicheskikh sistem [Research of electrophysical properties of polycrystalline silicon films for mems structures forming], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 9 (170), pp. 126-134.
25. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Yu., Kolomiitsev A.S., Bykov A.V. Fabrication of polycrystalline silicon elements for micro- and nanomechanical accelerometers. Chapter In: *Advanced Materials, Mechanical and Structural Engineering.* – Hong, Seo & Moon (Eds.). London: Taylor & Francis Group: CRC Press: Balkema, 2016, pp. 13-16.
26. Ageev O.A., Gusev E.Yu., Jityaeva J.Y., Ilina M.V., Bykov A.V. Grain size and doping effect on structure and electromechanical properties of polycrystalline silicon for MEMS applications, *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, Vol. 741, pp. 012001.
27. Ageev O.A., Konoplev B.G., Rubashkina M.V., Rukomoykin A.V., Smirnov V.A., Solodovnik M.S. Issledovanie vliyaniya na modul' Yunga geometricheskikh parametrov orientirovannykh nitevidnykh nanokristallov GaAs metodom atomno-silovoy mikroskopii [Study of the effect on the young's modulus of geometric parameters of oriented GaAs whisker nanocrystals by atomic force microscopy], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2013, Vol. 8, No. 1-2, pp. 27-32.
28. Dostanko A.P., Avakov S.M., Ageev O.A. [i dr.]. Tekhnologicheskie komplekisy integrirovannykh protsessov proizvodstva izdeliy elektroniki [Technological systems integrated production processes of electronics products]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016, 251 p.

29. *Bachman M.* RCA-1 Silicon wafer cleaning [Electronic resource]. Available at: <http://www.ampel.ubc.ca/nanofab/sop/rca-clean-1.pdf>. (accessed 8 October 2014).
30. *Kern W.* Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology, and applications. Noyes: William Andrew, 1993, 623 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Б.Г. Коноплев.

**Гусев Евгений Юрьевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [eyugusev@sfedu.ru](mailto:eyugusev@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

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