

## Раздел I. Нанoeлектроника

УДК 621.38-022.532

**В.В. Поляков**

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ**

*Рассматриваются технологические аспекты и конструктивные особенности гибридных сенсорных систем. Обсуждаются особенности и принципы построения элементов гибридных сенсорных систем, приведена их систематизация по конструктивным особенностям и технологии формирования элементов. Предложена классификация гибридных сенсорных систем по конструктивно-технологическим особенностям. Рассмотрена возможность использования различных материалов и технологий при формировании элементов гибридных систем с учетом биосовместимости. Отмечается, что при проектировании и разработке сенсорной системы необходимо учитывать размерный фактор, т.е. размер исследуемых объектов. Приводятся основные технологические процессы формирования элементов гибридных систем. Дана классификация процессов травления. Описаны основные принципы, лежащие в основе конструкции устройств сенсорных систем: принцип многоуровневости; принцип многоканальности (параллельности); принцип конвергенции; принцип дивергенции и принцип обратной связи. Сформулированы основные задачи и направления исследований в области создания гибридных сенсорных систем.*

*Гибридная сенсорная система; технология; микросистема; нанотехнология; биосенсор; классификация.*

**V.V. Polyakov**

### **TECHNOLOGICAL ASPECTS AND FEATURES OF SENSORS HYBRID SYSTEMS**

*Technological aspects and design features of hybrid sensor systems are considered in this paper. The features and principles of the hybrid sensor systems elements are discussed; their ranging on design features and technology of elements formation is given. A hybrid sensor systems classification by structural and technological features has been offered. The possibility of using different materials and technologies in the formation of hybrid systems elements based on biocompatibility has been considered. It is noted that at the design and development of the sensory system it is necessary to consider the size factor, which is the size of the studied objects. Here provides the basic technological processes of forming hybrid systems elements. The classification of etching processes is also given. Such basic principles underlying the design of sensor systems devices as the principle of multilevel; principle of multi-channel (parallel); principle of convergence; divergence principle and principle of feedback are described. The main tasks and directions of research in the field of hybrid sensor systems are formulated.*

*Hybrid sensor system; technology; microsystem; nanotechnology; biosensor; classification.*

**Введение.** С давних времен человек пытается создавать искусственные органы чувств: устройства типа «электронный нос» или «умная пыль». И только лишь благодаря развитию технологий на современном этапе развития науки и техники появилась возможность создавать различные устройства нанометрового масштаба с воспроизводимыми функциями нейромолекулярного уровня. Современная технология способна создавать интеллектуальные системы на кристалле, искусствен-

ные молекулы ДНК, управлять процессами воспроизводства и репродукции биологических тканей. Твердотельные технологии позволяют создавать устройства с минимальным размером элемента порядка 20 нм. Актуальной задачей, которая способна совершить революционный прорыв в ближайшем будущем, является создание устройств, работающих и объединенных между собой на основе сращивания живого и неживого в сенсорных устройствах и системах [1–3].

За последние годы продолжается неуклонный рост исследований в области биомедицинского направления за рубежом. Соединенные Штаты Америки направляют десятки миллиардов долларов, а страны Евросоюза сотни миллионов евро на финансирование данного направления. При этом отличительной чертой современной медицины является ее «биологизация», т.е. широкое применение подходов, базирующихся на методах молекулярной и клеточной биологии. Основным инструментом исследования генов являются микрочипы. Главной проблемой при использовании микрочипов является необходимость быстрого анализа данных и их интерпретации [4].

Отдельную группу микрочипов составляют микрофлюидные устройства, которые используются для изучения свойств жидкостей в малых объемах и применяются при постановке капиллярного электрофореза, иммуноанализа, полимеразной цепной реакции и в проточной цитометрии.

С появлением высокопроизводительных методов анализа генома и транскриптома в самое ближайшее время ожидается прорыв в области персонализации диагностики и разработки персонализированных средств лечения пациента с учетом особенностей его генома, транскриптома, протеома и метаболома.

В связи с особенностью и спецификой создаваемых современных устройств, применяемых для их производства процессов, физических, химических и биологических основ функционирования, можно говорить о тесной взаимосвязи и необходимости междисциплинарных связей в проектировании и создании гибридных систем. Особенно это актуально для устройств биомедицинского назначения с использованием элементной базы нанoeлектроники, микро- и наносистемной техники [3, 5].

Таким образом, особое место в развитии конструктивно-технологических особенностей и использовании междисциплинарных знаний будет иметь направление создания гибридных сенсорных систем для мониторинга состояния окружающей среды и человека.

Как известно, гибридной системой называют систему, содержащую компоненты, выполненные с использованием различных материалов и технологий, соединенных между собой на единой конструктивной основе. А к сенсорным системам живого организма относятся зрительная, слуховая, обонятельная, осязательная, вкусовая, болевая, тактильная, вестибулярный аппарат, проприоцептивная и интероцептивная воспринимающие системы организма.

В зависимости от экспериментов, проводимых на организмах животного происхождения и особенностях получения и обработки информации о биологическом объекте, принято использовать следующие термины:

«*invivo*» – т.е. внутри живого организма (обычно это происходит при тестировании на животных или клинических испытаниях);

«*invitro*» – опыты проводятся «в пробирке», т.е. вне организма, на культуре живых клеток или в бесклеточной модели;

«*insilico*» – это термин, обозначающий компьютерное моделирование (симуляцию) биологического эксперимента.

С точки зрения разновидностей, конструктивно-технологических особенностей и функционирования элементов устройств гибридных систем они подразделяются:

- ◆ на дистанционные (получение информации о состоянии окружающей среды на расстоянии);
- ◆ контактные (информация о состоянии среды и биологического объекта формируется при контакте с биологической средой);
- ◆ вживляемые (т.е. находящиеся и работающие внутри биологического объекта).

Последние особенно актуальны при переходе на персонализацию в медицинском обслуживании населения, использование «интеллектуальных» протезов, диагностика и анализ хронических заболеваний.

Одной из особенностей некоторых сенсорных устройств является то, что гибридные системы сочетают в себе органические и неорганические элементы. Обычно это различные функциональные элементы (электроды, биосенсоры, каналы), которые выполнены из различных материалов (металлов, кремния, органических элементов).

**Классификация гибридных сенсорных систем.** Таким образом, на основании вышеизложенного можно представить следующую укрупненную классификацию гибридных сенсорных систем (рис. 1).

Особое значение при проектировании и разработке сенсорной системы имеет значение размерный фактор, т.е. необходимо учитывать размер исследуемых объектов. Как известно, размер атома составляет десятые доли нанометра, поэтому размеры сепарационных устройств сенсорных систем, транспортные каналы и т.п. должны иметь соответствующие размеры при исследовании объектов на атомном уровне. Соответственно для биологических объектов, таких как ДНК (ширина – единицы нанометров, длина до единиц микрометров), протеины (единицы – десятки нанометров), вирусы (размеры до 100 нм), бактерии (от 1 нм до 10 микрометров), клетки (от 10 до 100 микрометров) необходимо иметь соответствующие геометрические размеры элементов гибридного сенсорного устройства.

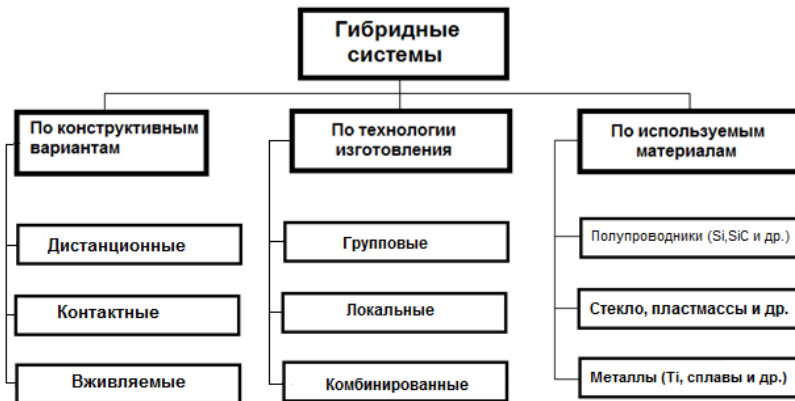


Рис. 1. Классификация гибридных сенсорных систем по конструктивно-технологическим особенностям

В исследовании биологических объектов принято использовать стекло или современные полимерные материалы. Это относительно дешевые, технологичные материалы, инертные по отношению к исследуемым объектам. Однако в случае необходимости создания гибридных устройств сенсорных систем данный материал (в настоящее время) не может являться основой для формирования элементов «на одном кристалле» интегрированных с устройствами обработки, анализа и ото-

бражения информации об исследуемом объекте. В связи с этим, актуальными материалами для построения подобных систем являются полупроводниковые материалы и некоторые металлы и сплавы. Что особенно выгодно их отличает в случае создания интегрированной (вживляемой) гибридной сенсорной системы.

Полупроводниковые материалы (кремний, карбид кремния, арсенид галлия и др.) могут быть использованы в качестве основы для построения сложных гибридных систем [6–8]. Сочетая различные технологические приемы объемную и (или) поверхностную технологию формирования элементов (ионно-плазменные процессы, фокусированные ионные и электронные пучки, LIGA-технология, быстрая термическая обработка и т.п.), зондовые технологии формирования элементов (локальное анодное окисление методом АСМ) с последующей пассивацией поверхности кристалла гибридной системы (например, по технологии ALD).

При разработке конструкции устройств сенсорных систем необходимо руководствоваться основными принципами их построения.

**1. Принцип многоуровневости.** В каждой сенсорной системе может существовать несколько промежуточных передаточных звеньев (уровней) на пути от рецепторов к центральному элементу анализа данных. При этом на уровне низших чувствительных центров могут формироваться безусловные сигналы как ответные реакции на данное раздражение. Это быстро протекающие процессы.

**2. Принцип многоканальности (параллельности).** Возбуждение всегда передается от чувствительных центров по нескольким параллельным путям. При этом потоки могут частично дублироваться и частично разделяться. По ним передается информация о различных свойствах раздражителя. Во всех сенсорных системах обязательно существуют три пути (канала) передачи возбуждения:

- 1) специфический путь, который ведет в первичную сенсорную зону;
- 2) неспецифический путь, который обеспечивает общую активность и тонус анализатора;
- 3) ассоциативный путь, который определяет биологическую значимость раздражителя и управляет вниманием.

**3. Принцип конвергенции.** Это схождение нервных путей в виде воронки. При этом нейрон верхнего уровня получает возбуждение от нескольких нейронов нижележащего уровня.

**4. Принцип дивергенции.** Это расхождение потока возбуждения, напоминающее расходящуюся воронку на несколько потоков от низшего звена к высшему.

**5. Принцип обратной связи.** Он означает влияние управляемого элемента на управляющий.

Особо следует остановиться на одном из важных элементов гибридной сенсорной системы – лаборатории-на-кристалле (ЛНК). Лаборатория-на-кристалле – это устройство, размеры которого составляют от нескольких квадратных миллиметров до нескольких квадратных сантиметров. На одном чипе ЛНК может производиться одна или несколько лабораторных функций. Обычно ЛНК объединяет компоненты микроэлектромеханических систем (МЭМС), в основе которых лежит микрофлюидная система. Микрофлюидика является междисциплинарной наукой, находящейся на стыке физики, химии, гидравлики, биологии, которая в первую очередь опирается на физику в манипуляции и исследовании небольших объемов жидкости. Поскольку некоторые биологические реакции могут проходить только при определенной температуре, управление тепловыми процессами и стабилизация температуры в ЛНК является актуальной задачей. Кроме того, для обеспечения автономности ЛНК и в силу гетерогенной интеграции, на чипе могут располагаться различные микронасосы, фильтры и клапаны, которые работают при низких напряжениях и мощностях.

Особенностью конструкции ЛНК является модульность, при этом каждый модуль имеет свои специфические задачи и самостоятельность. Например, каналы, клапаны и насосы, резервуары для пробы крови и различных биореагентов формируются в полимерном материале, а на кремниевой подложке – микрофлюидальный чип. При этом полимерная часть гибридного устройства фиксируется на кремниевом чипе. Модульное построение удешевляет систему по сравнению с полностью интегрированными ЛНК, однако существенными недостатками модульных систем является их громоздкость и сравнительно низкое быстродействие. В зависимости от заложенных в ЛНК принципов работы они подразделяются на системы с капиллярным управлением, управлением давлением, центробежные, электрокинетические и акустические.

С точки зрения технологии производства ЛНК следует отметить, что большинство всех процессов составляют процессы травления. На рис. 2 показаны основные процессы травления, используемые в настоящее время в технологии изготовления ЛНК.



Рис. 2. Классификация процессов травления

Следует отметить, что в настоящее время наиболее перспективными процессами формирования элементов гибридных систем являются:

- ◆ метод фокусированных ионных пучков используется в полупроводниковой промышленности, в биологии для некоторых анализов, осаждения, абляции и др. [9, 10];
- ◆ локальноанодное окисление для формирования элементов ЛНК на поверхности полупроводника или металла путем электрохимической реакции между зондом и подложкой с образованием оксидов и последующим травлением [11–13];
- ◆ одним из наиболее востребованных в технологии ЛНК является процесс объемной микрообработки методом LIGA-технологии. Главным достоинством LIGA-технологии – это точность, малая шероховатость стенок, высокое аспектное отношение [3];
- ◆ методы быстрого термического отжига (БТО) с помощью импульсных газоразрядных ламп, обработки поверхности пластины электронным пучком или обработки лучом лазера. Актуальность метода БТО в технологии ЛНК заключается в возможности управлять глубиной залегания легирующей примеси посредством изменения длительности и интенсивности БТО, формировать пассивирующие слои на поверхности без существенного влияния на ранее сформированную структуру, отсутствие дополнительных нарушений кристаллической структуры в объеме подложки, а также вследствие большой скорости отжига устраняется необходимость его проведения в вакууме для предотвращения окисления или загрязнений [14–17].

Исходя из актуальности используемых материалов в производстве гибридных сенсорных систем, на наш взгляд перспективным материалом является титан. Титан используется в медицине с начала прошлого века и хорошо зарекомендовал себя как биосовместимый материал. Мемристорные свойства оксида титана позволяют использовать его в качестве ячейки памяти, а в дальнейшем смогут заменить транзисторы [18, 19].

Таким образом, анализ технологических аспектов и конструктивных особенностей гибридных сенсорных систем показал, что для создания современных гибридных систем с такими характеристиками, как селективность, высокая чувствительность, безопасность применения, низкая себестоимость, должны быть использованы методы групповой обработки и технологии микроэлектроники, нано- и микросистемной техники, при учете подбора используемых материалов и их сочетаний, в том числе и с точки зрения биосовместимости.

**Заключение.** В соответствии с вышеизложенным, необходимо решить следующие задачи:

- ◆ создать модели и методы проектирования гибридных сенсорных систем на основе использования технологий микроэлектроники, нано- и микросистемной техники;
- ◆ разработать технологические маршруты изготовления и методики формирования элементов гибридных сенсорных систем;
- ◆ разработать и исследовать элементы устройств гибридных сенсорных систем, провести их апробацию для мониторинга жизнедеятельности, окружающей среды, химико-технологических процессов и т.п.;
- ◆ провести выработку рекомендаций по использованию гибридных сенсорных систем в устройствах контроля и обеспечения безопасности населения, промышленных и гражданских объектов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Polyakov V.V. Development and study of silicon dioxide nanostructured films forming on semiconductor structures surface // In book Advanced nano- and piezoelectric materials and their applications, editor Ivan A. Parinov. – Nova Science Publishers, 2014. – P. 19-60.
2. Лысенко И.Е. Метод проектирования двухосевых микромеханических сенсоров угловых скоростей и линейных ускорений RR-типа // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 4 (117). – С. 234-236.
3. Лысенко И.Е. Функционально интегрированные микро- и наномеханические сенсоры угловых скоростей и линейных ускорений. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 167 с.
4. Стратегия развития медицинской науки в РФ на период до 2025 года.
5. Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В., Котов В.Н., Негоденко О.Н. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 153 с.
6. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С., Киселев В.С., Конакова Р.В., Лебедев А.А., Миленин В.В., Охрименко О.Б., Поляков В.В., Светличный А.М., Чередниченко Д.И. Карбид кремния: технология, свойства, применение. – Харьков: ИСМА, 2010. – 532 с.
7. Агеев О.А., Сеченов Д.А., Светличный А.М., Касимов Ф.Д., Кадымов Г.Г. Газочувствительные датчики на основе карбида кремния. – Баку: Изд-во “Мутарджим”, 2004. – 92 с.
8. Ageev A.O., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Svetlichnyi A.M., Smirnov V.A. Photoassisted scanning-probe nanolithography on Ti films // Russian Microelectronics. – 2007. – Vol. 36, № 6. – P. 353-357.
9. Агеев О.А., Алексеев А.М., Внукова А.В., Громов А.Л., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Лисицын С.А. Исследование разрешающей способности наноразмерного профилирования методом фокусированных ионных пучков // Российские нанотехнологии. – 2014. – Т. 9, № 1-2. – С. 40-43.
10. Агеев О.А., Коломийцев А.С. Исследование параметров взаимодействия фокусированных ионных пучков с подложкой // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2011. – № 3 (89). – С. 20-25.

11. Ageev O.A., Alyabeva N.I., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A. Photoactivation of the processes of formation of nanostructures by local anodic oxidation of a titanium film // *Semiconductors*. – 2010. – Vol. 44, № 13. – P. 1703-1708.
12. Коноплев Б.Г., Агеев О.А. Элионные и зондовые нанотехнологии для микро- и наносистемной техники // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2008. – № 12 (89). – С. 165-175.
13. Агеев О.А., Поляков В.В., Алябьева Н.И., Кужелев М.В. Зондовая нанолaborатория Ntegra VITA для биологических применений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2008. – № 5 (82). – С. 198-201.
14. Светличный А.М., Сеченов Д.А., Бурштейн В.М., Воронцов Л.В., Поляков В.В., Соловьев С.И., Агеев О.А. Вакуумная установка импульсной термической обработки ИТО-18МВ // *Электронная промышленность*. – 1991. – № 3. – С. 6.
15. Светличный А.М., Поляков В.В., Кочеров А.Н. Окисление карбида кремния быстрым термическим отжигом // *Известия ТРТУ*. – 2004. – № 1 (36). – С. 104-105.
16. Сеченов Д.А., Светличный А.М., Поляков В.В. Фотостимулированные технологические процессы в кремниевых структурах. – Таганрог: ТРТУ, 2002. – 103 с.
17. Светличный А.М., Сеченов Д.А., Бурштейн В.М., Бражник В.А., Поляков В.В. Установка импульсной термообработки ИТО-18м // *Электронная промышленность*. – 1990. – № 3. – С. 62-64.
18. Авилон В.И., Агеев О.А., Коломийцев А.С., Коноплев Б.Г., Смирнов В.А., Цуканова О.Г. Формирование и исследование матрицы мемристоров на основе оксида титана методами зондовой нанотехнологии // *Известия высших учебных заведений. Электроника*. – 2014. – № 2 (106). – С. 50-57.
19. Агеев О.А., Блинов Ю.Ф., Ильин О.И. и др. Мемристорный эффект на пучках вертикально ориентированных углеродных нанотрубок при исследовании методом сканирующей туннельной микроскопии // *Журнал технической физики*. – 2013. – Т. 83, № 12. – С. 128-133.

## REFERENCES

1. Polyakov V.V. Development and study of silicon dioxide nanostructured films forming on semiconductor structures surface, *In book Advanced nano- and piezoelectric materials and their applications*, editor Ivan A. Parinov. Nova Science Publishers, 2014, pp. 19-60.
2. Lysenko I.E. Metod proektirovaniya dvukhosevykh mikromekhanicheskikh sensorov uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy RR-tipa [Method of designing a two-axis micromechanical sensor of angular velocities and linear accelerations RR-type], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 234-236.
3. Lysenko I.E. Funktsional'no integrirovannye mikro- i nanomekhanicheskie sensory uglovykh skorostey i lineynykh uskoreniy [Functionally integrated micro - and nanomechanical sensors of angular velocities and linear accelerations]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2013, 167 p.
4. Strategiya razvitiya meditsinskoj nauki v RF na period do 2025 goda [The strategy for the development of medical science in the Russian Federation for the period till 2025].
5. Ageev O.A., Mamikonova V.M., Petrov V.V., Kotov V.N., Negodenko O.N. Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin [Microelectronic transducers non-electrical quantities]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, 153 p.
6. Ageev O.A., Belyaev A.E., Boltovets N.S., Kiselev V.S., Konakova R.V., Lebedev A.A., Milenin V.V., Okhrimenko O.B., Polyakov V.V., Svetlichnyy A.M., Cherednichenko D.I. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primenenie [Silicon carbide: technology, properties, applications]. Khar'kov: ISMA, 2010, 532 p.
7. Ageev O.A., Sechenov D.A., Svetlichnyy A.M., Kasimov F.D., Kadyrov G.G. Gazochuvstvitel'nye datchiki na osnove karbida kremniya [Gas sensors based on silicon carbide]. Baku: Izd-vo "Mutardzhim", 2004, 92 p.
8. Ageev A.O., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Svetlichnyi A.M., Smirnov V.A. Photoassisted scanning-probe nanolithography on Ti films, *Russian Microelectronics*, 2007, Vol. 36, No. 6, pp. 353-357.
9. Ageev O.A., Alekseev A.M., Vnukova A.V., Gromov A.L., Kolomytsev A.S., Konoplev B.G., Lisitsyn S.A. Issledovanie razreshayushchey sposobnosti nanorazmernogo profilirovaniya metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [The study nanoscale resolution profiling method focused ion beams], *Rossiyskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnology], 2014, Vol. 9, No. 1-2, pp. 40-43.

10. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S. 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.
11. Ageev O.A., Alyabeva N.I., Konoplev B.G., Polyakov V.V., Smirnov V.A. Photoactivation of the processes of formation of nanostructures by local anodic oxidation of a titanium film, *Semiconductors*, 2010, Vol. 44, No. 13, pp. 1703-1708.
12. 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.
13. Ageev O.A., Polyakov V.V., Alyab'eva N.I., Kuzhelev M.V. Zondovaya nanolaboratoriya Ntegra VITA dlya biologicheskikh primeneniy [Probe nanolaboratory Ntegra VITA for biological applications] [Probe nanolaboratory Ntegra VITA for biological applications], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 5 (82), pp. 198-201.
14. Svetlichnyy A.M., Sechenov D.A., Burshteyn V.M., Vorontsov L.V., Polyakov V.V., Solov'ev S.I., Ageev O.A. Vakuumnaya ustanovka impul'snoy termicheskoy obrabotki ITO-18MV [Probe nanolaboratory Ntegra VITA for biological applications], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Industry], 1991, No. 3, pp. 6.
15. Svetlichnyy A.M., Polyakov V.V., Kocherov A.N. Okislenie karbida kremniya bystryim termicheskim otzhigom [The oxidation of silicon carbide rapid thermal annealing], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2004, No. 1 (36), pp. 104-105.
16. Sechenov D.A., Svetlichnyy A.M., Polyakov V.V. Fotostimulirovannyye tekhnologicheskiye protsessy v kremnievykh strukturakh [Photostimulated processes in silicon structures]. Taganrog: TRTU, 2002, 103 p.
17. Svetlichnyy A.M., Sechenov D.A., Burshteyn V.M., Brazhnik V.A., Polyakov V.V. Ustanovka impul'snoy termoobrabotki ITO-18m [Setting pulse heat treatment of ITO-18m], *Elektronnaya promyshlennost'* [Electronic Industry], 1990, No. 3, pp. 62-64.
18. Avilov V.I., Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Konoplev B.G., Smirnov V.A., Tsukanova O.G. Formirovaniye i issledovaniye matritsy memristorov na osnove oksida titana metodami zondovoy nanotekhnologii [The formation and study of the matrix of memristor-based titanium oxide methods probe nanotechnology], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* [News of Higher Educational Institutions. Electronics], 2014, No. 2 (106), pp. 50-57.
19. Ageev O.A., Blinov Yu.F., Il'in O.I. i dr. Memristornyy effekt na puchkakh vertikal'no orientirovannykh uglerodnykh nanotrubok pri issledovanii metodom skaniruyushchey tunnel'noy mikroskopii [Memristors effect on the beams vertically oriented carbon nanotubes in the study by scanning tunneling microscopy], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of technical physics], 2013, Vol. 83, No. 12, pp. 128-133.

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

**Поляков Вадим Витальевич** – Южный федеральный университет; e-mail: vpolyakov@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +78634360403; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

**Polyakov Vadim Vital'evich** – Southern Federal University; e-mail: vpolyakov@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, corps. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634360403; the department of nanotechnologies and microsystems; head of department; cand. of eng. sc.; associate professor.