

УДК 621.382.029.64

DOI 10.18698/0536-1044-2016-6-90-95

К вопросу влияния температуры на однородность удельного сопротивления подложек карбида кремния*

В.Н. Вьюгинов¹, А.Г. Гудков², В.Д. Шашурин²

¹ ЗАО «Светлана-Электронприбор», 194156, Санкт-Петербург, Российская Федерация, пр. Энгельса, д. 27

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

To the Question of Temperature Effect on the Resistivity Uniformity of Silicon Carbide Substrates

V.N. Viyuginov¹, A.G. Gudkov², V.D. Shashurin³

¹ ZAO Svetlana-Elektronpribor, 105005, Saint Petersburg, Russian Federation, Engels Ave., Bldg. 27

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: vvyuginov@yandex.ru, profgudkov@gmail.com, schashurin@bmstu.ru



Исследованы подложки карбида кремния политипа 6H-SiC диаметром 76 мм, изготовленные из монокристалла, выращенного с добавлением ванадия в качестве компенсирующей примеси. Рассмотрены методы измерения удельного сопротивления полуизолирующих подложек 6H-SiC в диапазоне $10^5 \dots 10^{12}$ Ом·см. Приведены типичные карты распределения удельного сопротивления в этих подложках до термообработки и после нее. Установлено улучшение однородности распределения удельного сопротивления по подложке после отжига при температуре 1 050 °С в инертной среде, а также стабильность этого параметра во времени. Результаты проведенного исследования показали возможность применения полученного полуизолирующего материала в качестве подложечного для производства СВЧ-транзисторов с двумерным каналом AlGaIn/GaN.

Ключевые слова: карбид кремния, электрические свойства, подложка, полупроводник, удельное сопротивление, температурное воздействие, монокристалл.



SiC substrates of 6H-SiC polytype with a diameter of 76 mm are studied in this article. The substrates are made of a single crystal, grown with the addition of vanadium as a compensating impurity. Methods of measuring resistivity of semi-insulating substrates 6H-SiC in the range of $10^5 \dots 10^{12}$ Ohm-cm are considered. Typical maps of resistivity distribution in these substrates before and after heat treatment are given. It is established that the uniformity of resistivity distribution across the substrate improves after annealing at 1050 °C in inert environment, and this parameter remains stable in time. The results of the study have shown that the obtained semi-insulating material can be used as a substrate for manufacturing microwave transistors with a two-dimensional AlGaIn/GaN channel.

Keywords: silicon carbide, electrical properties, substrate, semiconductor, resistivity, thermal effects, single crystal.

* Результаты получены в ходе выполнения прикладных научных исследований при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (уникальный идентификатор RFMEFI57414X0116).

Исследования карбида кремния (SiC) как материала для полупроводниковой электроники [1, 2] начал проводить О.В. Лосев в 30-х годах прошлого века. В дальнейшем были разработаны прототипы полупроводниковых приборов на основе SiC: диодов Шоттки [3], полевых транзисторов JFET [4] и MESFET [5], фотоприемников ультрафиолетового излучения [6], p-i-n-диодов [7] и лавинно-пролетных диодов [8].

Следует отметить, что поиск широкозонных полупроводников, способных заменить кремний для создания различных типовых силовых приборов, проводят достаточно давно [9]. Интенсивное развитие в последние годы технологии нитрида галлия (GaN) и твердых растворов на его основе позволяет расширить область применения этих полупроводников в создании монолитных интегральных схем СВЧ. В таблице представлено сравнение параметров некоторых полупроводниковых материалов, откуда видно, что GaN уступает SiC лишь по теплопроводности. Кроме того, рост эпитаксиальных слоев нитрида галлия происходит при меньших температурах и с использованием более дешевых материалов. Широкому использованию GaN для производства силовых приборов препятствовало отсутствие собственной подложки и низкое структурное совершенство получаемых эпитаксиальных слоев.

Отсутствие собственной подложки GaN приводит к тому, что эпитаксиальные слои GaN чаще всего выращивают на сапфире, который обладает низкой теплопроводностью, а также большим рассогласованием постоянной решетки с нитридом галлия и твердыми растворами (~13 %), что существенно снижает выходную мощность прибора и ограничивает область его применения. Переход на подложки SiC позволяет устранить эти недостатки и открывает

перспективы для дальнейшего развития силовой электроники, в том числе на основе СВЧ-транзисторов с двумерным каналом AlGaN/GaN (HEMT — High Electron Mobility Transistor). Другим достоинством такого перехода является возможность получения более надежных приборов с улучшенными параметрами, что позволит компенсировать более высокую стоимость подложек SiC.

Эпитаксию нитрида галлия можно проводить разными методами: HVPE [10], MOCVD [11] и MBE [11]. В зависимости от способа эпитаксии подложку в процессе изготовления эпитаксиального слоя подвергают нагреву до температуры от 500 до 1 100 °С. В связи с этим важна температурная стабильность и однородность параметров полуизолирующих подложек SiC, в первую очередь удельного сопротивления (УС).

Цель работы — исследование влияния температурного воздействия на УС подложек полуизолирующего карбида кремния

Важным вопросом обеспечения производства качественных подложек полуизолирующего карбида кремния является контроль однородности распределения УС по пластине в диапазоне $10^5 \dots 10^{12}$ Ом·см. Это сложная задача с точки зрения методики измерения. Для технологического контроля УС необходимо выбрать метод, позволяющий оперативно проводить измерения в процессе производства.

УС подложек можно определить с помощью методов разрушающего или неразрушающего контроля. К первым из них относят метод, основанный на измерении сопротивления между двумя омическими контактами, изготовленными на подложке, и метод измерения сопротивления между торцевыми омическими контактами на образцах, вырезанных из подложки [12].

Сравнение параметров полупроводниковых материалов

Параметр	Полупроводники			
	Si	GaAs	GaN	6H-SiC
Запрещенная зона, эВ	1,1	1,4	3,4	3,1
Подвижность электронов, см ² /(В·с)	1 400	8 500	1 500	600
Скорость насыщения $v \cdot 10^7$, см/с	1	2	2,5	2
Критическая напряженность электрического поля $E \cdot 10^6$, В/см	0,3	0,4	> 5	4
Теплопроводность, Вт/см	1 690	1 510	> 1 700	> 2 100

Однако методы контроля сопротивления между двумя омическими контактами практически неприменимы для подложек с высоким УС вследствие возникновения барьера Шоттки, что в результате ограничивает верхний предел измерений. Кроме того, после измерений подложка непригодна для продажи. К неразрушающим методам контроля относят СВЧ-метод малых возмущений, и метод, основанный на определении времени рассасывания индуцированного заряда.

Исследовали подложки карбида кремния политипа 6H-SiC диаметром 76 мм, изготовленные из монокристалла, выращенного с добавлением ванадия в качестве компенсирующей примеси. Типичная карта распределения УС, полученная на подложках с помощью установки COREMA-WT [13], приведена на рис. 1. Перед началом измерений подложку предварительно выдерживали в темноте в течение 40 мин. Измерения УС также проводили под светонепроницаемым колпаком для исключения фотоэффекта.

Распределение УС по подложке характерно для роста монокристалла из тщательно подготовленного источника и добавления компенсирующей примеси. На рис. 1 представлена типичная карта УС подложки SiC при температуре 27 °С, где присутствуют области (18 % площади подложки), в которых УС превышает верхний предел диапазона измерений ($1 \cdot 10^{12}$ Ом·см). Вероятно, в этих областях донорная примесь (азот)

полностью скомпенсирована акцепторной примесью (ванадий). Неоднородность УС на подложке объясняется тем, что обе примеси распределены по источнику неравномерно. Наряду с областями, в которых азот присутствует в малом количестве и может быть полностью скомпенсирован ванадием, существуют области с большим содержанием донорной примеси, которая не может быть скомпенсирована. Это связано с тем, что поток паров от источника имеет две фракции, отличающиеся составом. Вследствие соударений в ростовой камере с молекулами инертного газа (давление Ar составляет около 60 кПа) пар получает дополнительную хаотическую составляющую скорости движения, поэтому результат сублимации реализуется на поверхности подложки случайным образом, что проявляется в распределении УС по подложке. Вне областей полной компенсации УС подчиняется распределению Гаусса со среднеквадратичным значением $3,6 \cdot 10^{11}$ Ом·см и дисперсией порядка 50 %, что соответствует высокой степени очистки источника.

При производстве диодов или транзисторов на слоях нитрида галлия и твердых растворов происходит нагрев подложки до температуры порядка 1 000 °С. Результаты исследования влияния температуры на электрические свойства подложек SiC до и после отжига при температуре 1 050 °С, а также после выдержки в течение 7 дней при нормальной температуре (20 °С) приведены на рис. 1–3.

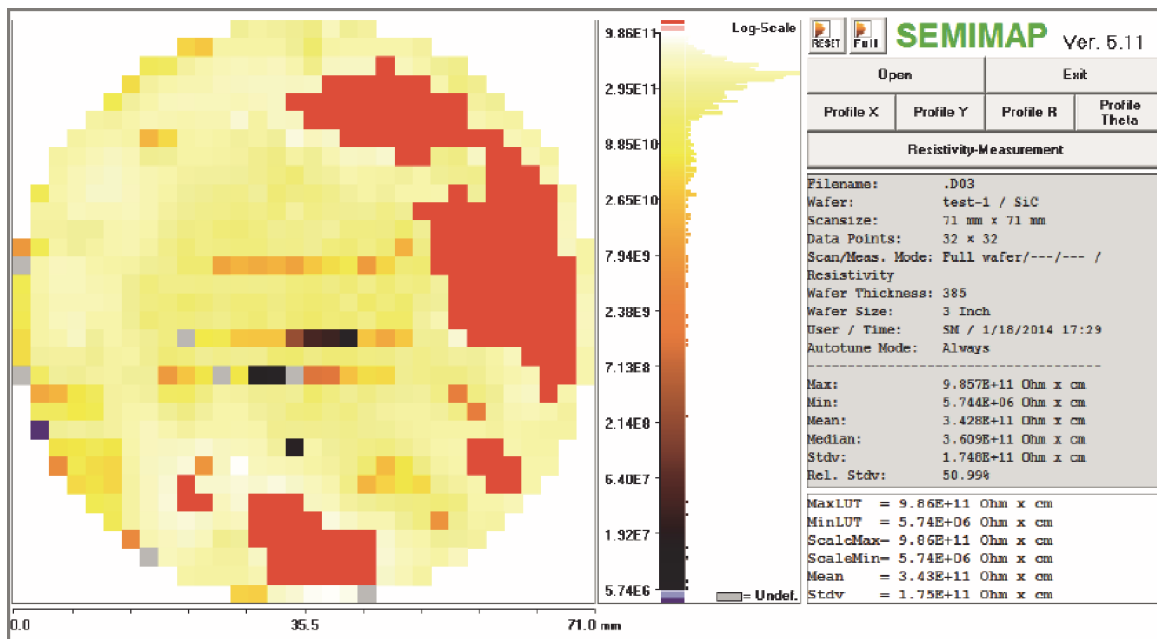


Рис. 1. Карта типичного УС подложки SiC при температуре 27 °С

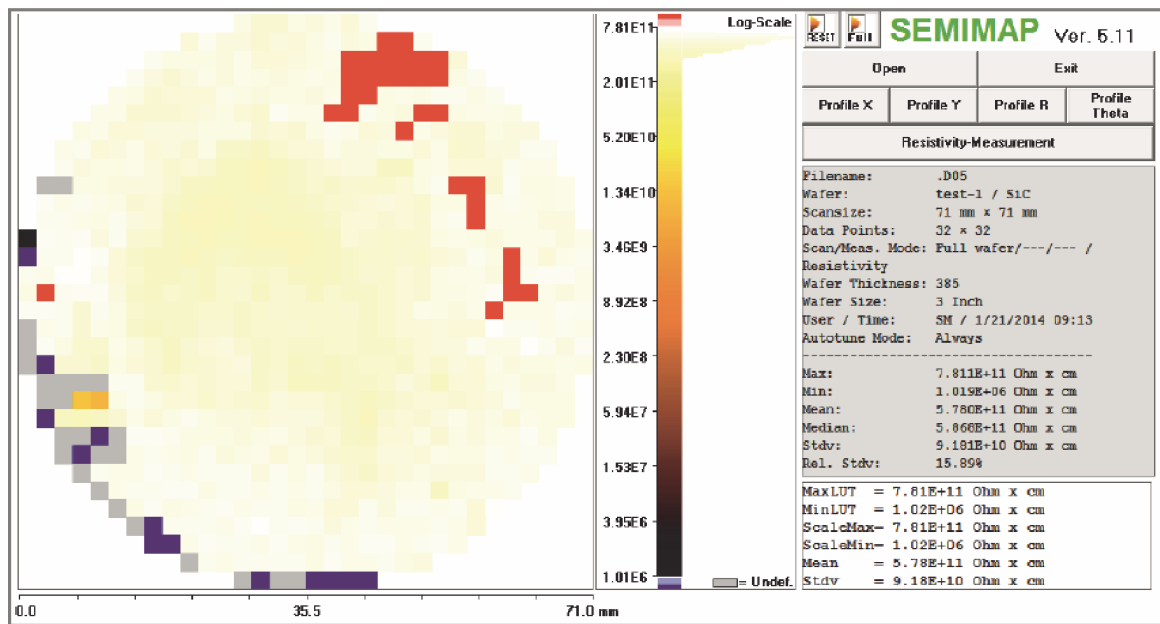


Рис. 2. Карта УС подложки после отжига

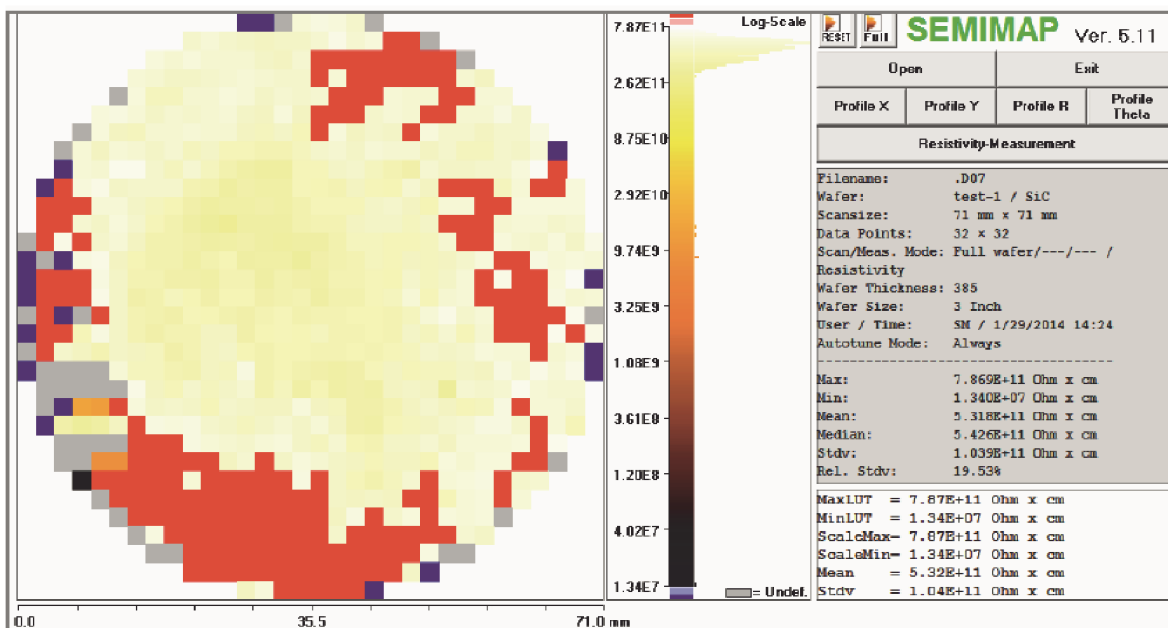


Рис. 3. Карта УС подложки после 7 дней выдержки

После отжига при температуре 1050 °С в инертной атмосфере распределение УС по пластине при 27 °С по-прежнему подчиняется распределению Гаусса, однако среднеквадратическое значение УС увеличилось до $5,8 \cdot 10^{11}$ Ом·см, а дисперсия уменьшилась до 16 %. В целом по подложке УС возросло и его распределение стало более равномерным (см. рис. 2). Область, в которой УС превышает верхний предел диапазона измерений, составила 10 %. В левой и нижней части подложки

наблюдались значительные области с сопротивлением, соответствующим границе верхнего предела измерений.

Повторные измерения УС подложек, подвергнутых температурной обработке, через 7 дней вылеживания в нормальных условиях (давление — 101 325 Па, температура — 20 °С, влажность (абсолютная и относительная) — 0) дали результат, приведенный на рис. 3. Среднеквадратическое значение УС составило $5,4 \cdot 10^{11}$ Ом·см, дисперсия 19 %, т. е. практически не из-

менились, а в левой и нижней части подложки сопротивление превысило верхний предел диапазона измерений.

Процесс отжига при температуре 1 050 °С в инертной среде повышает равномерность УС подложек в силу перераспределения компенсирующей примеси и снижения механических напряжений. После отжига этот эффект сохраняется при температуре 27 °С.

Выводы

1. Анализ результатов исследования влияния температурного воздействия на УС подложек полуизолирующего карбида кремния пока-

зал, что отжиг в инертной среде повышает равномерность распределения УС подложек в силу перераспределения компенсирующей примеси и снижения механических напряжений. После отжига этот эффект сохраняется при нормальных условиях.

2. Разработанная технология резки монокристаллов полуизолирующего карбида кремния диаметром 76 мм соответствует всем современным требованиям, предъявляемым к этому процессу. В настоящее время ЗАО «Светлана-Электронприбор» использует ее в комплексной технологии производства высококачественных подложек для СВЧ-приборов нового поколения.

Литература

- [1] Остроумов А.Г., Рогачев А.А. О.В. Лосев — пионер полупроводниковой электроники. *Сб. науч. тр. Физика: проблемы, история, люди*, Ленинград, Наука, 1986. 183 с.
- [2] Новиков М.А. Лосев О.В. — пионер полупроводниковой электроники. *Физика твердого тела*, 2004, т. 46, с. 5–9.
- [3] Afanasyev A.V., Ivanov B.V., Ilyin V.A., Kardo-Sysoev A.F., Kuznetsova M.A., Luchinin V.V. Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 740–742, pp. 1010–1013.
- [4] Deboy G., Ludwig H., Mallwitz R., Rupp R. New SiC JFET with Integrated Body Diode Boosts Performance of Photovoltaic Systems. *Proc. PCIM, May 2011*, 2011, Curran Associates, Nuremburg, 2011, pp. 204–213.
- [5] Baoxing Duan, Yintang Yang. New Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN HEMT structure with the partial silicon doping. *Micro & Nano Letters*, 2012, vol. 7. iss. 1, pp. 9–11.
- [6] Li L., Ryu Y., White H.W., Yu P. Characterization of ZnO UV photoconductors on the 6H-SiC substrate. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2010, vol. 7603. URL: <http://www.researchgate.net/publication/241455510> (дата обращения 28 февраля 2016).
- [7] Abdelkrim M., Loulou M., Gharbi R., Fathallah M., Pirri C.F., Tresso E. Static and dynamic electrical study of a-SiC:H based p–i–n structure, effect of hydrogen dilution of the intrinsic layer. *Solid-State Electronics*, 2007, vol. 51, iss. 1, pp. 159–163.
- [8] Mukherjee M., Majumder N., Roy S.K., Goswami K. GaN IMPATT Diode: a photo sensitive high power terahertz source. *Semicond Sci Technol*, 2007, vol. 22, pp. 1258–1267.
- [9] Лебедев А.А., Челноков В.Е. Широкозонные полупроводники для силовой электроники. *Физика и техника полупроводников*, 1999, т. 33, № 9, с. 1096–1099.
- [10] Zhang W., Meyer B.K. Growth of GaN quasi-substrates by hydride vapor phase epitaxy. *Physica status solidi (c)*, 2003, vol. 0, no. 6, pp. 1571–1582. doi: 10.1002/pssc.200303136.
- [11] Ambacher O. Growth and applications of Group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, vol. 31, iss. 20, pp. 2653–2710. doi: 10.1088/0022-3727/31/20/001.
- [12] Попов В.В. Методика измерения удельного сопротивления подложек полуизолирующего карбида кремния. *Машиностроитель*, 2014, № 11, с. 27–33.
- [13] *SemiMap Analytical Systems. Corema-WT*. URL: <http://www.semimap.de/COREMA-WT.htm> (дата обращения 28 февраля 2016).

References

- [1] Ostroumov A.G., Rogachev A.A., O.V. Losev — pioner poluprovodnikovoi elektroniki [O.V. Losev — pioneer of semiconductor electronics]. *Sb. Nauchnykh trudov. Fizika: prob-*

- lemy, istoriia, liudi* [Collection of Scientific works. Physics: problems, history, people]. Leningrad, Nauka publ., 1986. 183 p.
- [2] Novikov M.A. Losev O.V. — pioner poluprovodnikovoi elektroniki [O.V. Losev — pioneer of semiconductor electronics]. *Fizika tverdogo tela* [Physics of the Solid State]. 2004, vol. 46, pp. 5–9.
- [3] Afanasyev A.V., Ivanov B.V., Ilyin V.A., Kardo-Sysoev A.F., Kuznetsova M.A., Luchinin V.V. Superfast drift step recovery diodes (DSRDs) and vacuum field emission diodes based on 4H-SiC. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 740–742, pp. 1010–1013.
- [4] Deboy G., Ludwig H., Mallwitz R., Rupp R. New SiC JFET with Integrated Body Diode Boosts Performance of Photovoltaic Systems. *Proc. PCIM, May 2011*, 2011, Curran Associates, Nuremberg, 2011, pp. 204–213.
- [5] Baoxing Duan, Yintang Yang. New Al_{0.25}Ga_{0.75}N/GaN HEMT structure with the partial silicon doping. *Micro & Nano Letters*, 2012, vol. 7, iss. 1, pp. 9–11.
- [6] Li L., Ryu Y., White H.W., Yu P. Characterization of ZnO UV photoconductors on the 6H-SiC substrate. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 2010, vol. 7603. Available at: <http://www.researchgate.net/publication/241455510> (accessed 28 February 2016).
- [7] Abdelkrim M., Loulou M., Gharbi R., Fathallah R., Pirri C.F., Tresso E. Static and dynamic electrical study of a-SiC:H based p–i–n structure, effect of hydrogen dilution of the intrinsic layer. *Solid-State Electronics*, 2007, vol. 51, iss. 1, pp. 159–163.
- [8] Mukherjee M., Majumder N., Roy S.K., Goswami K. GaN IMPATT Diode: a photo sensitive high power terahertz source. *Semicond Sci Technol*, 2007, vol. 22, pp. 1258–1267.
- [9] Lebedev A.A., Chelnokov V.E. Shirokozonnnye poluprovodniki dlia silovoi elektroniki [Wide bandgap semiconductors for power electronics]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductor]. 1999, vol. 33, no. 9, pp. 1096–1099.
- [10] Zhang W., Meyer B.K. Growth of GaN quasi-substrates by hydride vapor phase epitaxy. *Physica status solidi (c)*, 2003, vol. 0, no. 6, pp. 1571–1582. doi: 10.1002/pssc.200303136.
- [11] Ambacher O. Growth and applications of Group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1998, vol. 31, iss. 20, pp. 2653–2710. doi: 10.1088/0022-3727/31/20/001.
- [12] Popov V.V. Metodika izmereniia udel'nogo soprotivleniia podlozhek poluizoliruiushchego karbida kremniia [Resistivity Measuring Technique of the Semi-Insulating Sic Wafers]. *Mashinostroitel'* [Mechanician]. 2014, no. 11, pp. 27–33.
- [13] *SemiMap Analytical Systems. Corema-WT*. Available at: <http://www.semimap.de/COREMA-WT.htm> (accessed 28 February 2016).

Статья поступила в редакцию 11.03.2016

Информация об авторах

ВЬЮГИНОВ Владимир Николаевич (Санкт-Петербург) — кандидат физико-математических наук, директор ЗАО «Светлана-Электронприбор» (194156, Санкт-Петербург, Российская Федерация, пр. Энгельса, д. 27, e-mail: vvyuginov@yandex.ru).

ГУДКОВ Александр Григорьевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: profgudkov@gmail.com).

ШАШУРИН Василий Дмитриевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технологии приборостроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: shashurin@bmstu.ru).

Information about the authors

VYUGINOV Vladimir Nikolaevich (Saint Petersburg) — Candidate of Science (Physics and Math), Director. ZAO Svetlana-Elektronpribor (105005, Saint Petersburg, Russian Federation, Engels Ave., Bldg. 27, e-mail: vvyuginov@yandex.ru).

GUDKOV Aleksandr Grigorievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technologies of Instrument Making Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: profgudkov@gmail.com).

SHASHURIN Vasilii Dmitrievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Technologies of Instrument Making Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: shashurin@bmstu.ru).