

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И МАРШРУТЫ TECHNOLOGICAL PROCESSES AND ROUTES

УДК 546.28'261:621.382.3

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-557-564

Влияние состава металлизации и параметров процесса вжигания на сопротивление омических контактов к 6H-SiC *n*-типа

В.И. Егоркин¹, В.Е. Земляков¹, А.В. Неженцев¹, В.А. Гудков², В.И. Гармаш¹

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия

²АО «НПП «Исток им. Шокина», г. Фрязино, Россия

kfn@miee.ru

Для карбида кремния задача получения низкоомных омических контактов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, несмотря на значительное количество экспериментальных данных, остается актуальной. В работе рассмотрено влияние состава Ni- и TiAl-металлизации, параметров процесса вжигания, подлегирования контактного слоя карбида кремния (SiC) ионами азота N⁺, а также кристаллографической Si- или C-грани на сопротивление омических контактов к 6H-SiC *n*-типа проводимости. Установлено, что наибольшее влияние на процесс формирования омических контактов к 6H-SiC *n*-типа оказывает процесс вжигания, в результате которого контактное сопротивление снижается примерно в шесть раз. Процесс подлегирования контактного слоя N⁺ также снижает контактное сопротивление почти в четыре раза. В результате исследования установлено, что низкоомные контакты могут быть получены на обеих гранях с примерно одинаковым низким сопротивлением. Для C-грани оптимальной является TiAl-металлизация, а для Si-грани – Ni-металлизация. Такой выбор металлизации позволяет получать омические контакты на обеих полярных гранях с примерно одинаковыми сопротивлениями порядка $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см².

Ключевые слова: карбид кремния; омический контакт; ионная имплантация

Благодарность: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.581.21.0021, уникальный идентификатор RFMEFI58117X0021).

Для цитирования: Влияние состава металлизации и параметров процесса вжигания на сопротивление омических контактов к 6H-SiC *n*-типа / В.И. Егоркин, В.Е. Земляков, А.В. Неженцев и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 6. – С. 557–564. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-557-564

Influence of Metallization Composition and Annealing Process Parameters on Resistance of Ohmic Contacts to 6H-SiC *n*-type

V.I. Egorkin¹, V.E. Zemlyakov¹, A.V. Nezhenstev¹, V.A. Gudkov², V.I. Garmash¹

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²JSC «PRC» Istok named after Shokin», Fryazino, Russia

kfn@miee.ru

Abstract: For most commonly used semiconductor materials the contact metal systems, giving low-resistance ohmic contacts and their formation methods are known and investigated. For the materials, relatively recently applied for serial production of semiconductor devices, particularly for silicon carbide, the task of producing low-resistance ohmic devices, in spite of a significant quantity of experimental data remains an urgent one. For this purpose the works directed at production of the ohmic contacts to silicon carbide with the improved operation characteristics were carried out and are conducted. In the work the influence of the metallization composition (Ni and TiAl) the influence of the metallization composition (Ni and TiAl), the annealing process parameters, the doping of the silicon carbide contact layer by nitrogen N⁺ ions, as well as the crystallographic face (Si or C) on the resistance of ohmic contacts to 6H-SiC has been considered. It has been found that the most important influence on the process of forming the ohmic contacts to n-6H-SiC has the annealing process, as a result of which the contact resistance becomes approximately 6 times reduced. The process of contact layer doping is the second in importance. This process can reduce the contact resistance on the average by 4 times. As a result of the study it has been established that the low-resistance contacts can be obtained on both surfaces with approximately equal low resistances. The TiAl metallization is the most optimal for the C surface and Ni for the Si surface. This makes it possible to obtain the ohmic contacts on both polar surfaces with approximately the same resistances, equal to $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ohm·cm².

Keywords: silicon carbide; ohmic contact; ion implantation

For citation: Egorkin V.I., Zemlyakov V.E., Nezhenstev A.V., Gudkov V.A., Garmash V.I. Influence of metallization composition and annealing process parameters on resistance of ohmic contacts to 6H-SiC *n*-type. *Proc. Univ. Electronics*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 557–564. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-6-557-564

Acknowledgements: the work has been supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant agreement 14.581.21.0021, unique identifier RFMEFI58117X0021).

Введение. Омический контакт является частью большинства полупроводниковых приборов. Теоретически образование барьерного или проводящего типов контактов определяется соотношением термодинамической работы выхода электронов из выбранного металла и полупроводника, а также типом проводимости полупроводника. На поверхности полупроводникового материала существует большое количество поверхностных энергетических уровней, образующихся из-за наличия оборванных химических связей, адсорбированных примесей, а также из-за возможного образования про-

межуточных химических соединений осаждаемого металла с полупроводниковой подложкой. Поэтому ожидаемые результаты достигаются далеко не всегда. Кроме того, образование проводящего типа контакта не гарантирует получения хорошего омического контакта, который кроме линейности ВАХ должен иметь низкое контактное сопротивление. Таким образом, задача получения хорошего омического контакта решается в значительной степени экспериментальным путем.

Для большинства широко используемых полупроводниковых материалов контактные металлические системы с низкоомными омическими контактами и методы их формирования исследованы и хорошо известны [1]. Для материалов, которые относительно недавно стали применяться для серийного производства полупроводниковых приборов, в частности для карбида кремния (SiC), задача получения низкоомных омических контактов, несмотря на значительное количество экспериментальных данных, остается актуальной. С этой целью проводятся работы, направленные на получение омических контактов к SiC с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

В настоящее время металлизация на основе никеля (Ni) является наиболее распространенной для изготовления омических контактов к *n*- и *p*-слоям SiC. Она позволяет получать омический контакт с удельным сопротивлением порядка 10^{-4} Ом·см². Использование Ni подразумевает проведение высокотемпературной термической обработки (950–1000 °C). Отжиг приводит к реакции Ni с SiC, в результате образуется соединение Ni₂Si, которое играет решающую роль в формировании омического контакта к SiC *n*-типа [2–4]. Именно Ni, подверженный температурной обработке, является основой для омических контактов карбид-кремниевых приборов, серийно выпускаемых фирмой CREE (США). Похожих омических характеристик можно добиться, используя металлизацию на основе титана (Ti) [5], которая также широко распространена. Работа выхода электронов из Ni составляет 4,9 эВ из Ti – 4,5эВ.

Одним из способов снижения сопротивления контактов является подлегирование приконтактной области [6]. В литературе рассматриваются не все технологические параметры, влияющие на уровень контактного сопротивления, также не во всех работах указывается кристаллографическая грань, на которой формировался омический контакт.

Цель настоящей работы – определение степени влияния технологических параметров на характеристики получаемых контактов к 6H-SiC *n*-типа.

Эксперимент. Для изготовления омических контактов выбраны кристаллографическая грань карбида кремния (Si- или C-грань); система Ni- или TiAl-металлизации. Приповерхностная область подлегирировалась ионами N⁺ до уровня концентрации $>5 \cdot 10^{19}$ см⁻³ с последующим отжигом при температуре 1800 °C. Вжигание металлизации проводилось при температуре до 1000 °C.

Каждый параметр имеет два значения, что позволяет исследовать 16 сочетаний параметров, не повторяющих друг друга.

Для экспериментов взяты лели-кристаллы с уровнем концентрации доноров $(2-5) \cdot 10^{18}$ см⁻³. Определение кристаллографической грани проводилось химическим травлением в расплаве KOH. После травления C-грань оставалась гладкой, а на Si-грани проявлялись мелкие риски от механической обработки.

Половина поверхности каждого образца подлегирировалась имплантацией ионов N⁺ дозой 800 мкКл/см². Имплантацию проводили на установке ионной имплантации «Лада-30». Затем осуществлялся отжиг при температуре 1800 °C. Такой режим обеспечивает концентрацию доноров в приповерхностной области $>5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Для отжига использовалась установка резистивного нагрева собственной конструкции с графитовым нагревателем, позволяющая отжигать при температурах до 2100 °C в импульсном режиме

(нагрев за 30–40 с). Температура контролировалась вольфрам-рениевой термопарой. Установка дает возможность проводить термообработку в атмосфере инертного газа.

Для изготовления контактных площадок во время напыления на установке электронно-лучевого осаждения Kurt J. Lesker на поверхности образца крепилась маска. В результате формировались контактные площадки, представляющие собой четыре круга диаметром 200 мкм, расположенных вдоль одной прямой с шагом 1000 мкм. Контактное сопротивление $R_{\text{конт}}$ определялось четырехзондовым методом [7].

Контактное сопротивление вычисляется по формуле

$$R_{\text{конт}} = \pi a^2 \left\{ \frac{U_2}{I} - \left(\frac{U_3}{I} \right) \frac{\ln[(3d/2a) - 1/2]}{2 \ln 2} \right\},$$

где a – радиус контактов; d – расстояние между центрами контактов. Равенство справедливо при $a \ll d$.

Перед измерениями контактного сопротивления линейность и наклон ВАХ контактов проверялись пропусканием тока через соседние контактные площадки. Затем на нелегированной и легированной ионами N^+ областях каждой пластины измерялось контактное сопротивление. Получено восемь результатов измерений для пластин без вжигания металлизации. Далее все образцы отжигались в аргоне при температуре 1000 °С на установке БТО UniTemp 1200 и измерения повторялись. Получено еще восемь значений контактного сопротивления с применением вжигания металлизации.

Контактное сопротивление – основная характеристика контактов. Наклон ВАХ, который определяется суммой контактного сопротивления и сопротивления полупроводника, и линейность ВАХ использовались в качестве дополнительных характеристик для получения более полной информации.

Результаты и их обсуждение. Обработка результатов эксперимента сводилась к определению общего среднего, среднего значения для уровня каждого параметра. Затем определялось влияние каждого параметра на контактное сопротивление при двух уровнях выбранного параметра процесса. Результаты с нелинейными характеристиками в расчет не принимались. Результаты проведения совместной обработки параметров процесса представлены в табл.1.

Таблица 1

Результаты совместной обработки параметров процесса изготовления омических контактов к 6H-SiC n -типа

Table 1

The results of ohmic contacts to silicon carbide manufacturing process analysis

Параметр процесса	Грань		Отношение средних значений $R_{\text{конт}}$ (большого к меньшему)
	Si	C	
Среднее значение $R_{\text{конт}}$, Ом·см ²	$3,29 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	1,28
Вжигание	Есть	Нет	–
Среднее значение $R_{\text{конт}}$, Ом·см ²	$8,32 \cdot 10^{-4}$	$5,04 \cdot 10^{-3}$	6,06
Подлегирование	Есть	Нет	–
Среднее значение $R_{\text{конт}}$, Ом·см ²	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$3,63 \cdot 10^{-3}$	1,62
Металлизация	Ni	TiAl	–
Среднее значение $R_{\text{конт}}$, Ом·см ²	$3,61 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	2,86

Наибольшее влияние на уровень $R_{\text{конт}}$ оказывает процесс вжигания, т.е. в результате вжигания металлизации средний уровень сопротивления снижается в 6 раз. Среднее значение $R_{\text{конт}}$ для Ni-металлизации оказалось почти в 3 раза больше, чем для TiAl-металлизации. Использование подлегирования поверхностного слоя ионами N^+ снижает уровень $R_{\text{конт}}$ в 1,6 раза. Меньшее влияние на уровень $R_{\text{конт}}$ оказывает кристаллографическая грань SiC: для C-границы среднее $R_{\text{конт}}$ примерно на 30 % ниже. Таким образом, одним из необходимых условий получения низкоомных контактов к 6H-SiC n -типа является вжигание металлизации.

Режимы создания омических контактов, не включающие вжигания металлизации, не являются оптимальными. В связи с этим значения $R_{\text{конт}}$, полученные на образцах, не подвергавшихся вжиганию, исключены и проведена повторная обработка результатов измерений только для образцов, на которых металлизация вжигалась (табл.2).

Таблица 2
Результаты измерения контактного сопротивления образцов,
подвергшихся вжиганию

Table 2

The measuring results of the annealed samples resistance

Грань	Подлегирование	Металлизация	$R_{\text{конт}}, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$
Si	Есть	Ni	$2,56 \cdot 10^{-4}$
Si	Есть	TiAl	$3,71 \cdot 10^{-4}$
Si	Нет	Ni	$4,58 \cdot 10^{-4}$
Si	Нет	TiAl	$3,50 \cdot 10^{-3*}$
C	Есть	Ni	$5,16 \cdot 10^{-4}$
C	Есть	TiAl	$2,50 \cdot 10^{-4}$
C	Нет	Ni	$5,02 \cdot 10^{-4}$
C	Нет	TiAl	$8,04 \cdot 10^{-4}$
Среднее значение			$8,32 \cdot 10^{-4}$

*Нелинейная характеристика контакта

Обработка результатов сводилась к получению средних значений и их попарному сравнению (табл.3). Результат с нелинейной характеристикой в расчет не принимался.

Результаты табл.3 отличаются от результатов, представленных в табл.1. Так, для образцов, на которых металлизация вжигалась, важным параметром становится подлегирование приповерхностного слоя ионами N^+ . Данная операция снижает средний уровень контактного сопротивления почти в 4 раза. Таким образом, еще одним необходимым условием получения низкоомных омических контактов к 6H-SiC n -типа является подлегирование приповерхностного слоя донорной примесью либо использование материала с высокой исходной концентрацией доноров.

Таблица 3
Результаты обработки параметров процесса изготовления омических контактов
к образцам 6H-SiC n -типа, подвергшихся вжиганию

Table 3

The analysis of the annealed samples resistance results

Параметр процесса	Грань		Отношение средних значений $R_{\text{конт}}$ (большого к меньшему)
	Si	C	
Среднее значение $R_{\text{конт}}, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$5,18 \cdot 10^{-4}$	2,21
Подлегирование	Есть	Нет	—
Среднее значение $R_{\text{конт}}, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$	$3,48 \cdot 10^{-4}$	$1,32 \cdot 10^{-3}$	3,78
Металлизация	Ni	TiAl	—
Среднее значение $R_{\text{конт}}, \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$	$4,33 \cdot 10^{-4}$	$4,75 \cdot 10^{-4}$	1,1

Проведена оценка влияния повторной термической обработки на $R_{\text{конт}}$. При этом остальные параметры фиксировались, а время отжига $t_{\text{сум}}$ суммировалось. Результаты Si- и С-границ представлены на рис.1,а. Зависимость контактного сопротивления от суммарного времени вжигания для Ni- и TiAl-металлизаций приведена на рис.1,б.

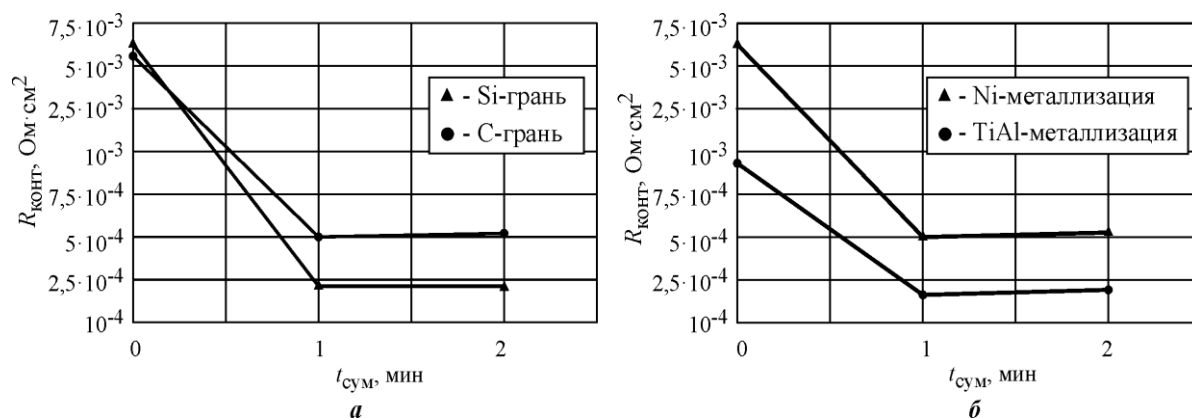


Рис.1. Зависимость контактного сопротивления $R_{\text{конт}}$ от суммарного времени вжигания $t_{\text{сум}}$: а – для Si- и С-границ (Ni-металлизация, легирование); б – для Ni- и TiAl-металлизаций (С-грань, легирование)

Fig.1. RTA time dependence $t_{\text{сум}}$ of $R_{\text{конт}}$: а – for Si-face and C-face (Ni metallization and doping were used) б – for Ni metallization and TiAl metallization (the C-face and the doping were used)

Из рис.1 видно, что повторный отжиг не приводит к существенному изменению сопротивления омических контактов. Также очевидно, что минимальное сопротивление достигается при использовании TiAl-металлизации на С-границе и Ni-металлизации на Si-границе.

Оценка морфологии поверхности проводилась с помощью оптического микроскопа. На рис.2 приведены изображения поверхности контактов с наименьшим сопротивлением. Видно, что образцы имеют достаточно гладкую морфологию поверхности.

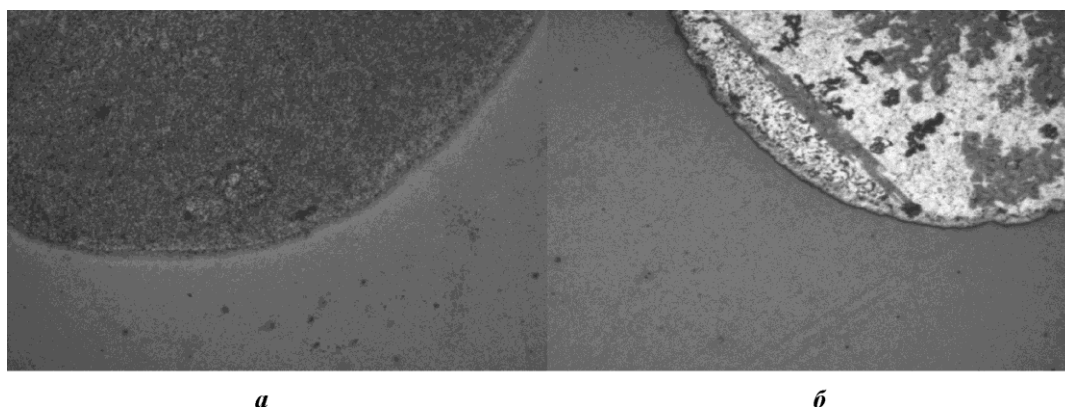


Рис.2. Изображение поверхности омических контактов к легированному азотом SiC: а – Ni-металлизация, Si-грань; б – TiAl-металлизация, С-грань

Fig.2. The surface image of annealed ohmic contacts to N-doped SiC: а – Ni metallization, Si-face; б – TiAl metallization, C-face

Заключение. Результаты исследования технологических параметров изготовления омических контактов к 6H-SiC *n*-типа показали, что наибольшее влияние на уровень контактного сопротивления оказывает процесс термической обработки – вжигание металлизации. Подлегирирование контактного слоя ионами азота также существенно снижает уровень контактного сопротивления. Применение этих двух процессов при изготовлении омических контактов к *n*-6H-SiC является необходимым условием получения низкого контактного сопротивления. Также важен выбор контактной металлизации. Так, для Si-границы Ni-металлизация позволяет получать контактное сопротивление примерно на 40 % ниже, а на C-границы TiAl-металлизация в два раза снижает контактное сопротивление. Такой выбор металлизации позволяет получать омические контакты на обеих полярных гранях с примерно одинаковыми сопротивлениями порядка $2,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·см².

Литература

1. Бланк Т.В., Голдберг Ю.А. Механизм протекания тока в омических контактах металл–полупроводник // ФТП. – 2007. – Т. 41. – № 11. – С. 1281–1308.
2. Evans L.J., Okojie R. S., Lukco D. Development of an extreme high temperature *n*-type ohmic contact to silicon carbide // Materials Science Forum. Trans. Tech. Publications. – 2012. – Vol. 717. – P. 841–844.
3. Fabrication of ohmic contact on the carbon-terminated surface of *n*-type silicon carbide / Mingsheng Xu, Xiaobo Hu, Yan Peng et al. // J. of Alloys and Compounds. – 2013. – Vol. 550. – P. 46–49.
4. Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti₃SiC₂ on *n*- and *p*-type 4H-silicon carbide / K. Buchholt, R. Ghandi, M. Domeij et al. // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 98. – No. 4. – P. 042108.
5. Shu-Cheng Chang, Shui-Jinn Wang, Kai-Ming Uang, Bor-Wen Liou. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to *N*-type 4H-SiC // Solid-State Electronics. – 2005. – Vol. 49. – No. 12. – P. 1937–1941.
6. Uemoto T. Reduction of ohmic contact resistance on *n*-type 6H-SiC by heavy doping // Japanese J. of Applied Physics. – 1995. – Vol. 34. – No. 1A. – P. 17–19.
7. Shur M.S. GaAs devices and circuits. – Springer Science & Business Media, 2013. – 670 p.

Поступила 23.03.2018 г.; принята к публикации 25.09.2018 г.

Егоркин Владимир Ильич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д.1), kfn@miee.ru

Земляков Валерий Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), VZML@rambler.ru

Неженцев Алексей Викторович – аспирант, инженер кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), alekseyy_nejencev@rambler.ru

Гудков Владимир Ильич – кандидат технических наук, начальник сектора АО «НПП «Исток» им. Шокина» (Россия, 141190, г. Фрязино, Вокзальная ул., д.2а), gudkov_va@mail.ru

Гармаш Валентин Игоревич – инженер кафедры квантовой физики и наноэлектроники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), gudkov_va@mail.ru

References

1. Blank T. V., Gol'Dberg Y. A. Mechanisms of current flow in metal-semiconductor ohmic contacts. *Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 11, pp. 1263–1292. (in Russian).
2. Evans L. J., Okojie R. S., Lukco D. Development of an extreme high temperature *n*-type ohmic contact to silicon carbide. *Materials Science Forum. Trans Tech Publications*, 2012, vol. 717, pp. 841–844.
3. Mingsheng Xu, Xiaobo Hu, Yan Peng, Kun Yang, Wei Xia, Guojian Yu, Xiangang Xu. Fabrication of ohmic contact on the carbon-terminated surface of *n*-type silicon carbide. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 550, pp. 46–49.
4. Buchholt K., Ghandi R., Domeij M., Zetterling C-M, Jun Lu, Eklund P., Hultman L. and Lloyd A. Ohmic contact properties of magnetron sputtered Ti₃SiC₂ on *n*- and *p*-type 4H-silicon carbide. *Applied physics letters*, 2011, vol. 98, no. 4, p. 042108.
5. Shu-Cheng Chang, Shui-Jinn Wang, Kai-Ming Uang, Bor-Wen Liou. Investigation of Au/Ti/Al ohmic contact to *N*-type 4H-SiC. *Solid-state electronics*, 2005, vol. 49, no. 12, pp. 1937–1941.
6. Uemoto T. Reduction of ohmic contact resistance on *n*-type 6H-SiC by heavy doping. *Japanese journal of applied physics*, 1995, vol. 34, no. 1A, pp. 17–19.
7. Shur M. S. *GaAs devices and circuits*. Springer Science & Business Media, 2013. 670 p.

Submitted 23.03.2018; Accepted 25.09.2018.

Information about the authors:

Vladimir I. Egorkin – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Leading Researcher of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), kfn@miee.ru

Valeriy E. Zemlyakov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Scientific Researcher of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), VZML@rambler.ru

Aleksey V. Nezhentsev – PhD student, Engineer of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), alekseyy_nejencev@rambler.ru

Vladimir A. Gudkov – Cand. Sci. (Eng.), Chief of the sector, JSC «RPC «Istok named after Shokin» (Russia, 141190, Fryazino, Vokzalnaya str., 2A), gudkov_va@mail.ru

Valentin I. Garmash – Engineer of the Quantum Physic and Nanoelectronic Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), gudkov_va@mail.ru

Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»

Полные тексты статей журнала с 2009 по 2017 гг. доступны на сайтах Научной электронной библиотеки: www.elibrary.ru и журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»: <http://ivuz-e.ru>