

Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 538.915

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19301>

ВЛИЯНИЕ САМОКОМПЕНСАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКА НА НЕОДНОРОДНОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО БАРЬЕРА ШОТТКИ В КОНТАКТАХ НА ОСНОВЕ III-НИТРИДОВ

А. В. Филимонов [✉], В. Б. Бондаренко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

[✉] afilimonov@spbstu.ru

Аннотация. В работе исследуются контактные структуры с барьером Шоттки на основе III-нитридов. С использованием представления о дискретном распределении заряда электроактивных дефектов в области обеднения полупроводника анализируются неоднородности высоты барьера Шоттки с учетом сил зеркального изображения. Определены характерные величины и масштабы изменения эффективного барьера в контакте, обусловленные флуктуациями электрических полей заряженных атомов примеси и прорастающих дислокаций несоответствия. Показано, что при сильной компенсации полупроводника, вследствие захвата носителей на дислокационные состояния (эффект самокомпенсации), средние значения неоднородности высоты эффективного барьера Шоттки достигают величины порядка 100 мэВ. Продемонстрирована возможность минимизации исследуемых неоднородностей путем выбора уровня легирования полупроводника.

Ключевые слова: эффективный барьер Шоттки, самокомпенсация III-нитридов, естественный размерный эффект, неоднородности барьера Шоттки

Для цитирования: Филимонов А. В., Бондаренко В. Б. Влияние самокомпенсации полупроводника на неоднородности эффективного барьера Шоттки в контактах на основе III-нитридов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 3. С. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19301>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19301>

EFFECT OF SEMICONDUCTOR SELF-COMPENSATION ON THE INHOMOGENEITIES OF THE EFFECTIVE SCHOTTKY BARRIER IN III-NITRIDE-BASED CONTACTS

A. V. Filimonov [✉], V. B. Bondarenko

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

St. Petersburg, Russia

[✉] afilimonov@spbstu.ru

Abstract. This paper examines Schottky barrier contact structures based on III-nitrides. Using the concept of discrete charge distribution of electroactive defects in the semiconductor depletion region, inhomogeneities in the Schottky barrier height have been analyzed, taking into account the mirror image forces. Characteristic quantities and scales of effective barrier changes in the contact were determined, caused by fluctuations in the electric fields of charged impurity atoms and threading misfit dislocations. The average inhomogeneities in the effective

Schottky barrier height were shown to reach values of approximately 100 meV while strong semiconductor compensation due to carrier trapping at dislocation states (i.e., the self-compensation effect) took place. The possibility of minimizing these inhomogeneities by selecting the semiconductor doping level was demonstrated.

Keywords: effective Schottky barrier, self-compensation of III-nitrides, natural size effect, Schottky barrier inhomogeneities

For citation: Filimonov A. V., Bondarenko V. B., Effect of semiconductor self-compensation on the inhomogeneities of the effective Schottky barrier in III-nitride-based contacts, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (3) (2026) 9–17. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19301>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Выпрямляющий контакт металл-полупроводник (контакт Шоттки) является практически необходимой составной частью импульсных, высокочастотных и сверхвысокочастотных электронных схем. Свойства такого контакта используются в поверхностно-барьерных структурах для обработки сигналов при вертикальном переносе заряда (в диодах Шоттки) и для управления латеральным током (например, в полевых транзисторах с затвором Шоттки). В настоящее время особое внимание уделяется исследованию соответствующих контактных структур в силовых приборах на основе карбида кремния [1] и нитридов элементов III группы [2 – 7].

В указанных материалах, в силу технологических особенностей синтеза, содержится значительное количество протяженных линейных дефектов – прорастающих дислокаций несоответствия, обладающих плотностью порядка 10^9 см^{-2} и более [8]. Заполнение дислокационных электронных состояний приводит к формированию локально-неоднородного электрического поля у поверхности и в контактных структурах [9]. Это обстоятельство, очевидно, приводит к изменениям высоты барьера Шоттки в контакте металл-полупроводник ввиду действия сил зеркального изображения, определяя соответствующий избыточный ток через контакт.

Известно, что вследствие перераспределения электронной плотности на поверхности металла высота эффективного барьера зависит от величины приконтактной напряженности электрического поля F [10]:

$$U_{\text{eff}}(F) \approx U_0 - \sqrt{\frac{e^3 F}{\epsilon}}, \quad (1)$$

где U_0 – величина изгиба зон полупроводника, ϵ – его диэлектрическая проницаемость.

В ряде случаев указанное понижение барьера в контактах металл-полупроводник может быть значительным (т.е. превышать характерную тепловую энергию kT) вследствие локальных флуктуаций полей дискретных зарядов легирующей примеси у межфазной границы. Ранее было показано [11], что в области пространственного заряда примесных полупроводников имеет место естественный размерный эффект, вследствие которого в слоях обеднения контактных структур, на масштабах длин экранирования, не происходит статистического усреднения данных электрических полей в широком диапазоне уровней легирования. Однако, как показывают оценки, в обычных контактах металл-полупроводник существенное изменение высоты эффективного барьера возможно при наличии высоких степеней легирования (порядка 10^{19} см^{-3}) [12] или при формировании равновесного диффузионно-дрейфового распределения электроактивных дефектов [13].

Дополнительного исследования заслуживают частично-компенсированные системы, в которых возможна самоорганизация заряженной примеси [14]. Некоторым аналогом частичной самоорганизации является появление заряженных дислокаций [8, 15].

Цель настоящей работы – определение возможных неоднородностей барьера Шоттки, вызванных флуктуациями полей электроактивных дефектов (дислокаций и атомов примеси), в структурах на основе III-нитридов, с учетом сил зеркального изображения.



В дальнейшем рассматривается выпрямляющий контакт металл – алюмо-галлиевый нитрид (AlGaN) в состоянии теплового равновесия.

Модель полностью обедненного слоя

Профиль изгиба зон в полупроводнике можно рассчитать путем решения одномерного уравнения Пуассона. Поскольку для выпрямляющего контакта в большинстве случаев с хорошей точностью выполняется условие $U_0 \gg kT$, вполне применима модель полностью обедненного слоя. В рамках данного приближения объемный заряд в области изгиба зон представляется локализованным зарядом легирующей примеси (для определенности – донорной) с концентрацией N_0 и электронным зарядом, захваченным на дислокационных состояниях. С учетом такой своеобразной частичной самокомпенсации полупроводника для планарной структуры контакта имеем следующее уравнение:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{4\pi e^2 N_0}{\varepsilon} \cdot (1 - K), \quad (2)$$

где x – декартова координата, перпендикулярная плоскости контакта; K – уровень самокомпенсации полупроводника.

Величина K должна зависеть от концентрации дислокаций N_{disl} и заряда, накопленного на их электронных состояниях и характеризуемого линейной плотностью λ .

В простейшем случае равномерного распределения компенсирующего заряда величина K следует выражению:

$$K = \frac{\lambda N_{disl}}{eN_0}. \quad (3)$$

Поскольку в правой части уравнения (2) теперь находится, с учетом выражения (3), величина, не зависящая от координаты, в качестве решения, удовлетворяющего стандартным граничным условиям, для профиля изгиба зон получаем следующую степенную функцию:

$$U(x) = U_0 \left(\frac{L_0 - x}{L_0} \right)^2. \quad (4)$$

Параметр L_0 , имеющий размерность длины в выражении (4) и определяющий ширину области пространственного заряда, выражается следующим образом:

$$L_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon U_0}{2\pi e^2 N_0 (1 - K)}}. \quad (5)$$

Полученное распределение поля в контакте (4), очевидно, является математическим ожиданием случайной величины, конкретные значения которой зависят от степени локализации точечных и линейных дефектов в обедненной области полупроводника. В дальнейшем для проведения статистического анализа будем использовать ранее примененный алгоритм [9, 11], в рамках которого предполагается некоррелированное распределение электроактивных дефектов в полупроводнике.

Неоднородности барьера Шоттки: случай собственного полупроводника

Прежде всего рассмотрим частный случай нелегированного полупроводника в контакте с металлом, когда объемный заряд формируется только заряженными дислокациями. В этом случае ширина области обеднения зависит от произведения двух величин: концентрации дислокаций и заселенности дислокационных состояний:

$$L_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon U_0}{2\pi e \lambda N_{disl}}}. \quad (6)$$

При наличии пуассоновского ансамбля заряженных дислокаций характерная величина флуктуаций напряженности электрического поля имеет вид [9]:

$$\delta F = \frac{4\lambda \sqrt{\pi N_{disl}}}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Представленная выше функция (1) случайного аргумента F удовлетворяет методу переноса ошибок [16]. Этот метод позволяет определять с приемлемой точностью величину δU_{eff} — характерных флуктуаций высоты эффективного барьера Шоттки:

$$\delta U_{eff} \approx \left| \frac{\partial U_{eff}}{\partial F} \right|_{F_0} \cdot \delta F, \quad (8)$$

где F_0 — средняя величина напряженности электрического поля на межфазной границе в контакте, которая выражается как $F_0 = 4\pi e N_s / \varepsilon$; при этом величина N_s определяет поверхностную концентрацию заряда в данной системе и следует выражению $N_s = \lambda N_{disl} L_0 / e$.

Вычисление значения производной функции $U_{eff}(F)$ при $F = F_0$ с учетом выражения (7) и подстановка результата в выражение (8) приводит к следующему результату:

$$\delta U_{eff} = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{\frac{e^3 \lambda}{L_0}}. \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) показывает, что для типичных величин параметров рассматриваемой структуры ($\varepsilon \approx 10$ [17], $U_0 \approx 0,3$ эВ, $N_{disl} \approx 10^{10}$ см⁻²) и близких к максимально возможной плотности заряда $\lambda \approx 0,01$ ед. СГСЭ, значения флуктуации высоты эффективного барьера Шоттки в среднем оказываются соизмеримыми по порядку величины с характерной тепловой энергией kT при комнатной температуре.

Неоднородности барьера Шоттки: случай легированного полупроводника

Более общий случай предполагает наличие легирующей примеси (доноров) с частичной самокомпенсацией полупроводника за счет заполнения дислокационных состояний. При этом выражение для поверхностной концентрации заряда в контакте имеет следующий вид:

$$N_s = N_0 L_0 - \frac{\lambda N_{disl} L_0}{e} = N_0 L_0 (1 - K). \quad (10)$$

В этой формуле ширина области пространственного заряда L_0 определяется выражением (5). Соответствующее среднее значение напряженности приконтактного поля оказывается пропорциональным $\sqrt{1 - K}$.

Вклад пуассоновского ансамбля ионизованных доноров в неоднородность этого поля характеризуется величиной δF_{ion} , которая выражается следующим образом [11]:

$$\delta F_{ion} = \frac{4e}{\varepsilon} \sqrt{\frac{\pi N_0}{L_0}}. \quad (11)$$

С учетом статистической независимости подсистем зарядов собственных и примесных дефектов (дислокаций и доноров) и их вкладов в флуктуацию полей (см. выражения (7) и (11)), для среднеквадратичного отклонения величины напряженности поля в контакте имеем:

$$\delta F = \frac{4}{\varepsilon} \sqrt{\pi \left(\frac{e^2 N_0}{L_0} + \lambda^2 N_{disl} \right)}. \quad (12)$$

Применив снова метод переноса ошибок (см. формулу (8)), получаем окончательное выражение для величины δU_{eff} :

$$\delta U_{eff} = \frac{1}{\varepsilon} \sqrt{\frac{e^3}{L_0 (1 - K)}} \left(\frac{e}{L_0} + \lambda K \right). \quad (13)$$

Типичные зависимости δU_{eff} от уровня легирования полупроводника для трех значений плотности заряженных дислокаций приведены на рис. 1.

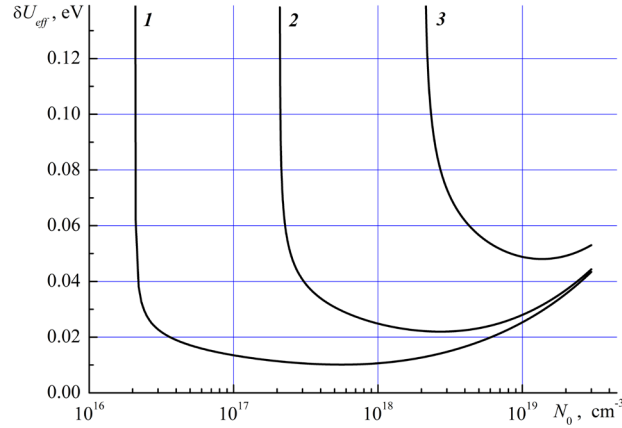


Рис. 1. Зависимости средних значений неоднородности высоты эффективного барьера Шоттки от уровня легирования структур AlGaIn для трех значений плотности их дислокаций N_{disl} , см^{-2} : 10^9 (1), 10^{10} (2) и 10^{11} (3). Линейная плотность заряда дислокаций $\lambda = 0,01$ ед. СГСЭ, величина изгиба зон $U_0 = 0,3$ эВ

Анализ и обсуждение полученных результатов

Прежде всего следует отметить, что на зависимостях, представленных на рис. 1, имеются области резкого роста величины ΔU_{eff} по мере приближения к значениям уровня самокомпенсации полупроводника, близким к единице. Непосредственно из выражения (13) следует, что при $K \rightarrow 1$ значения ΔU_{eff} пропорциональны $(1 - K)^{-1/4}$ и формально обращаются в бесконечность. Ограничение величин неоднородностей произойдет вследствие конечности значений приконтактного изгиба зон полупроводника и эффектов экранирования, аналогичных таковым, имеющих место в сильно компенсированных полупроводниках [18]. В рамках представленной здесь модели реально достигаемые значения ΔU_{eff} могут иметь порядок 100 мэВ, что многократно превышает типичные величины флуктуаций высоты барьера Шоттки $e^2/\epsilon L_0$ в отсутствие самокомпенсации полупроводника (т.е. при $K = 0$). Характерный масштаб неоднородностей, определенных таким образом, сопоставим с радиусом ридовского цилиндра [8]:

$$R = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi e N_0}} = \sqrt{\frac{K}{\pi N_{disl}}}. \quad (14)$$

Из выражения (14) очевидно, что при высоких уровнях самокомпенсации полупроводника (т.е. при $K \approx 1$) соответствующий масштаб сравним с величиной среднего расстояния между дислокациями. Следовательно, указанные неоднородности барьера Шоттки уже не являются мелкомасштабными. Кроме того, стоит отметить немонотонность зависимости

$$\Delta U_{eff} = \Delta U_{eff}(N_0).$$

Физическая причина такого поведения функции ΔU_{eff} — в конкуренции эффекта увеличения мощности протяженных источников поля и подавляющего действия естественного размерного эффекта при сильной самокомпенсации полупроводника. Из графиков на рис. 1 следует, что существует оптимальная величина концентрации легирующей примеси N_0^{opt} , которой соответствует минимум неоднородностей эффективного барьера Шоттки. Исходя из зависимости (13), результат получается в явном виде:

$$N_0^{opt} = \frac{\lambda N_{disl}}{e} + \left(\frac{\lambda^2 N_{disl}}{2e^3} \sqrt{\frac{\epsilon U_0}{2\pi}} \right)^{2/3}. \quad (15)$$

С точки зрения технологии наибольший интерес может представлять зависимость N_0^{opt} от плотности заряженных дислокаций. Соответствующие графики для двух значений

заселенности дислокационных состояний приведены на рис. 2. Однако последующий анализ выражения (15) показал, что при относительно небольших значениях плотности дислокаций, не превышающих 10^{10} см^{-2} , значения оптимальных уровней легирования в основном определяются вторым слагаемым. Поэтому в большинстве случаев величина N_0^{opt} практически пропорциональна $N_{disl}^{2/3}$.

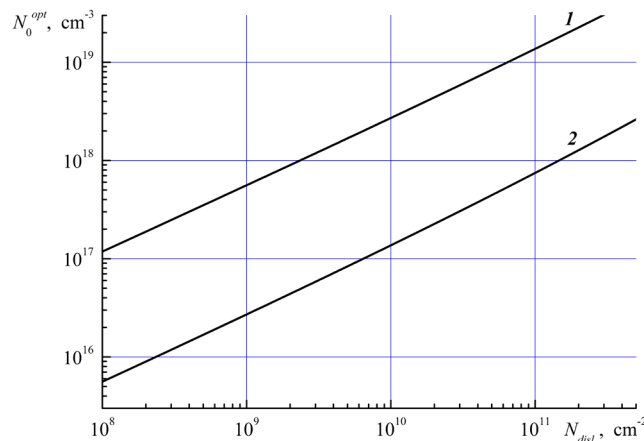


Рис. 2. Зависимости величины оптимальной концентрации доноров в структуре AlGaIn от плотности в ней дислокаций при двух значениях линейной плотности их заряда λ , ед. СГСЭ: 0,010 (1) и 0,001 (2).
Величина изгиба зон $U_0 = 0,3 \text{ эВ}$

Полученные результаты, в рамках представленной модели, согласуются с опытными данными, представленными в ряде работ (см., например, статьи [19, 20]). В обзорной статье [19], посвященной контактам Шоттки на основе AlGaIn, отмечается, что неоднородности высоты барьера, обусловленные дислокациями и точечными дефектами, действительно могут достигать значений порядка 100 мэВ. В статье [20] о влиянии легирования на механизмы токопереноса показано, что изменение уровня легирования может приводить к немонотонному изменению высоты барьера в контакте Шоттки.

Заключение

В настоящей работе проведен в рамках единой аналитической модели систематический анализ влияния флуктуаций электрического поля, обусловленных случайным распределением заряженных дислокаций и ионизованных доноров, на неоднородности эффективного барьера Шоттки в контактах на основе III-нитридов. Показано, что в условиях сильной самокомпенсации полупроводника, возникающей вследствие захвата носителей на дислокационные состояния, средние значения флуктуаций высоты эффективного барьера Шоттки могут достигать значений порядка 100 мэВ, что уже сопоставимо с величинами изгиба зон и, следовательно, способно оказывать определяющее влияние на токоперенос в реальных приборах.

Ключевым результатом работы следует считать установление немонотонной зависимости величины неоднородностей от уровня легирования. Показано существование оптимальной концентрации донорной примеси, при которой флуктуации барьера минимальны. Данный результат имеет прямое практическое значение, поскольку указывает технологический путь повышения однородности и воспроизводимости параметров диодов Шоттки и транзисторов с затвором Шоттки на основе нитрида галлия и его твердых растворов.

Несмотря на сделанные упрощения (отсутствие учета корреляции в расположении дефектов и влияния границы раздела), предложенная модель закладывает основу для интерпретации ряда экспериментальных данных по исследованию контактов металл-полупроводник и может быть распространена на более сложные случаи, включая неравновесные условия и температурные зависимости.



Полученные результаты рекомендуется использовать при проектировании силовых и высокочастотных приборов на основе III-нитридов с целью минимизации разброса характеристик и повышения надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kimoto T., Cooper J. A. Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 2014. 555 p.
2. Kalinina E. V., Kuznetsov N. I., Dmitriev V. A., Irvine K. G., Carter C. H. Schottky barriers on *n*-GaN grown on SiC // Journal of Electronic Materials. 1996. Vol. 25. May. Pp. 831–834.
3. Shiojima K., Woodall J. M., Eiting C. J., Grudowski P. A., Dupuis R. D. Effect of defect density on the electrical characteristics of *n*-type GaN Schottky contacts // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1999. Vol. 17. No. 5. Pp. 2030–2033.
4. Tracy K. M., Hartlieb P. J., Einfeldt S., Davis R. F., Hurt E. H., Nemanich R. J. Electrical and chemical characterization of the Schottky barrier formed between clean *n*-GaN(0001) surfaces and Pt, Au, and Ag // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 94. No. 6. Pp. 3939–3948.
5. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A., Salnikov A. S., Dobush I. M., Novikov V. A., Ivonin I. V. Nature of size effects in compact models of field effect transistors // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 119. No. 9. P. 094505.
6. Тихомиров В. Г., Чижиков С. В., Гудков А. Г., Устинов В. М. Влияние поверхностных ловушек на статические характеристики и разброс тока насыщения канала GaN НЕМТ-транзисторов // Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 22. С. 43–46.
7. Царик К. А., Чуканова О. Б., Козловская Е. А. Особенности конструкции гетероструктур при построении GaN нормально-закрытых транзисторов для силовых монолитных интегральных схем // Наноиндустрия. 2023. Т. 16. № 1. С. 70–79.
8. Красавин С. Е. О влиянии заряженных дислокационных стенок на подвижность в эпитаксиальных слоях GaN // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. № 5. С. 616–619.
9. Бондаренко В. Б., Филимонов А. В., Kumar R. Хаотический потенциал заряженных дислокаций в гетероконтактах III-нитридов // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 1. С. 12–14.
10. Родерик Э. Х. Контакты металл-полупроводник. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1982. 208 с.
11. Бондаренко В. Б., Кузьмин М. В., Кораблев В. В. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 8. С. 964–968.
12. Bondarenko V. B., Davydov S. N., Nacke B., Filimonov A. V. Chaotic potential on the degenerated semiconductor surface // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 806. July. Pp. 17–23.
13. Бондаренко В. Б., Филимонов А. В., Королева Е. Ю. Барьер Шоттки при равновесном распределении примеси в полупроводнике // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 10. С. 79–81.
14. Бондаренко В. Б., Филимонов А. В. Хаотический потенциал на поверхности компенсированного полупроводника в условиях самоорганизации электрически активных дефектов // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 9. С. 1223–1226.
15. Шикин В. Б., Шикина Ю. В. Заряженные дислокации в полупроводниковых кристаллах // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 8. С. 887–917.
16. Худсон Д. Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 298 с.
17. Jena D., Wood C. Polarization effects in semiconductors: From *ab initio* theory to device applications. New York: Springer, 2008. 515 p.
18. Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
19. Besendörfer S., Meissner E., Medjdoub F., Derluyn J., Friedrich J., Erlbacher T. The impact of dislocations on AlGaIn/GaN Schottky diodes and on gate failure of high electron mobility transistors // Scientific Reports. 2020. Vol. 10. 14 October. P. 17252.

20. Pu T., Tang S.-F., Kuang-Po H., Chiu H.-C., Liu X. AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on free-standing GaN substrates with a Si doped barrier layer // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2022. Vol. 10. 7 April. Pp. 318–323.

REFERENCES

1. Kimoto T., Cooper J. A., Fundamentals of silicon carbide technology: growth, characterization, devices, and applications, Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, USA, 2014.
2. Kalinina E. V., Kuznetsov N. I., Dmitriev V. A., et al., Schottky barriers on *n*-GaN grown on SiC, J. Electron. Mater. 25 (May) (1996) 831–834.
3. Shiojima K., Woodall J. M., Eiting C. J., et al., Effect of defect density on the electrical characteristics of *n*-type GaN Schottky contacts, J. Vac. Sci. Technol. B. 17 (5) (1999) 2030–2033.
4. Tracy K. M., Hartlieb P. J., Einfeldt S., et al., Electrical and chemical characterization of the Schottky barrier formed between clean *n*-GaN(0001) surfaces and Pt, Au, and Ag, J. Appl. Phys. 94 (6) (2003) 3939–3948.
5. Torkhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A., et al., Nature of size effects in compact models of field effect transistors, J. Appl. Phys. 119 (9) (2016) 094505.
6. Tikhomirov V. G., Chizhikov S. V., Gudkov A. G., Ustinov V. M., The effect of surface traps on the static characteristics and the saturation current spread in the channel of GaN HEMTs, Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki. 49 (22) (2023) 43–46 (in Russian).
7. Tsarik K. A., Chukanova O. B., Kozlovskaya E. A., Design features of heterostructures for construction of GaN normally-off transistors for power monolithic integrated circuits, Nanoindustry. 16 (1) (2023) 70–79.
8. Krasavin S. E., Effect of charged dislocation walls on mobility in GaN epitaxial layers, Semiconductors. 46 (5) (2012) 616–619.
9. Bondarenko V. B., Filimonov A. V., Kumar R., A chaotic potential of charged dislocations in group III-nitride heterojunctions, Tech. Phys. Lett. 47 (1) (2021) 8–10.
10. Rhoderick E. H., Williams R. H., Metal-semiconductor contacts (Monographs in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 19), Clarendon Press, Oxford Science Publications, 1988.
11. Bondarenko V. B., Korablev V. V., Kuzmin M. V., Analysis of inherent potential nonuniformities at the intrinsic-semiconductor surface, Semiconductors. 35 (8) (2001) 927–931.
12. Bondarenko V. B., Davydov S. N., Nacke B., Filimonov A. V., Chaotic potential on the degenerated semiconductor surface, Key Eng. Mater. 806 (Jul) (2019) 17–23.
13. Bondarenko V. B., Filimonov A. V., Koroleva E. Y., The Shottky barrier at homogeneous impurity distribution in a semiconductor, J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech. 4 (5) (2010) 859–861.
14. Bondarenko V. B., Filimonov A. V., On a chaotic potential at the surface of a compensated semiconductor under conditions of the self-assembly of electrically active defects, Semiconductors. 49 (9) (2015) 1187–1190.
15. Shikin V. B., Shikina Yu. V., Charged dislocations in semiconductor crystals, Phys. Usp. 38 (8) (1995) 845–875.
16. Hudson D. J., Statistics. Lectures on elementary statistics and probability, CERN Yellow Reports: Monographs, Geneva, Switzerland, 1964.
17. Jena D., Wood C., Polarization effects in semiconductors: From *ab initio* theory to device applications, Springer, New York, 2008.
18. Shklovskii B. I., Efros A. L., Electronic properties of doped semiconductors, Springer Science & Business Media, Berlin, Heidelberg, Germany, 2013.
19. Besendörfer S., Meissner E., Medjdoub F., et al., The impact of dislocations on AlGaIn/GaN Schottky diodes and on gate failure of high electron mobility transistors, Sci. Rep. 10 (14 Oct) (2020) 17252.
20. Pu T., Tang S.-F., Kuang-Po H., et al., AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes on free-standing GaN substrates with a Si doped barrier layer, IEEE J. Electron Devices Soc. 10 (7 Apr) (2022) 318–323.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

ФИЛИМОНОВ Алексей Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы, соруководитель Научно-образовательного центра «Физика нанокompозитных материалов электронной техники» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

afilimonov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-2793-5717

БОНДАРЕНКО Вячеслав Борисович — кандидат физико-математических наук, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

vyacheslav.b.bondarenko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9357-3902

THE AUTHORS

FILIMONOV Alexey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

afilimonov@spbstu.ru

ORCID: 0000-0002-2793-5717

BONDARENKO Vyacheslav B.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

vyacheslav.b.bondarenko@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9357-3902

Статья поступила в редакцию 04.03.2026. Одобрена после рецензирования 21.04.2026. Принята 21.04.2026.

Received 04.03.2026. Approved after reviewing 21.04.2026. Accepted 21.04.2026.