

Оптический
журналФизика полупроводников и элементы оптоэлектроники
Semiconductor physics and optoelectronics elements

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-02-34-39

УДК 621.315.592.2

Влияние условий формирования и отжига
на параметры Pt/InAlAs барьеров ШотткиИлья Юрьевич Гензе^{1✉}, Максим Сергеевич Аксенов²,
Мария Алексеевна Парамонова³, Дмитрий Владимирович Дмитриев⁴,
Константин Сергеевич Журавлёв⁵^{1, 2, 4, 5}Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения
Российской академии наук, Новосибирск, Россия^{1, 2, 3}Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия¹genze@isp.nsc.ru<https://orcid.org/0009-0004-0605-0620>²aksenov@isp.nsc.ru<https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>³m.paramonova@g.nsu.ru<https://orcid.org/0009-0000-8170-2773>⁴ddmitriev@isp.nsc.ru<https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>⁵zhur@isp.nsc.ru<https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>

Аннотация

Предмет исследования. В данной работе изучены Au/Pt/Ti/Pt/*i*(*n*)-In_{0,52}Al_{0,48}As(001) ме-
забарьеры Шоттки, сформированные после ионной и жидкостной очистки поверхности InAlAs,
с последующим отжигом при температурах 300, 350 и 400 °C продолжительностью до 16 мин.
Цель работы. Установить влияние предварительной ионной очистки поверхности InAlAs и от-
жига на параметры (высоту барьера и коэффициент идеальности) Pt/*n*-InAlAs барьеров Шот-
тки. **Метод.** Параметры рассчитаны путём анализа вольтамперных характеристик в рамках
теории термоэлектронной эмиссии. **Основные результаты.** Были определены зависимости вы-
соты барьера и коэффициента идеальности от времени и температуры отжига. Показано, что
применение ионной очистки в совокупности с отжигом позволяет получать бо́льшую высоту
барьера (0,83 эВ) и меньший коэффициент идеальности (1,08) по сравнению с использованием
только жидкостной обработки поверхности. **Практическая значимость.** Полученные резуль-
таты могут быть полезны для совершенствования технологии формирования барьеров Шоттки
на основе InAlAs.

Ключевые слова: барьер Шоттки, InAlAs, Pt, ионная очистка, вольтамперная характери-
стика, термоэлектронная эмиссия

Ссылка для цитирования: Гензе И.Ю., Аксенов М.С., Парамонова М.А., Дмитриев Д.В.,
Журавлёв К.С. Влияние условий формирования и отжига на параметры Pt/InAlAs барьеров
Шоттки // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 34–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-34-39>

Коды OCIS: 160.6000, 160.3900, 310.1860.

Influence of formation conditions and annealing on the parameters of Pt/InAlAs Schottky barriers

ILYA YU. GENZE¹✉, MAXIM S. AKSENOV², MARIA A. PARAMONOVA³,
DMITRY V. DMITRIEV⁴, KONSTANTIN S. ZHURAVLEV⁵

^{1, 2, 4, 5}Rzhanov Institute of Semiconductor Physics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

^{1, 2, 3}Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

¹genze@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0009-0004-0605-0620>

²aksenov@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>

³m.paramonova@ngsu.ru

<https://orcid.org/0009-0000-8170-2773>

⁴ddmitriev@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>

⁵zhur@isp.nsc.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>

Abstract

Subject of study. In this work, Au/Pt/Ti/Pt/*i(n)*-In_{0.52}Al_{0.48}As(001) mesa Schottky barriers formed after ion and liquid treatment of the InAlAs surface, followed by annealing at temperatures of 300, 350 and 400 °C durations up to 16 min were studied. **Aim of study** is to establish the effect of preliminary ion treatment of the InAlAs surface and annealing on the parameters (barrier height and ideality factor) of Pt/*n*-InAlAs Schottky barriers. **Method.** The parameters were calculated by analyzing the current-voltage characteristics within the framework of thermionic emission theory. **Main results.** The dependences of the barrier height and ideality factor on annealing time were determined. It has been shown that the use of ion etching in combination with annealing makes it possible to obtain a higher barrier height (0.83 eV) and a lower ideality factor (1.08) compared to using only liquid surface treatment. **Practical significance.** The results obtained can be useful for improving the technology for the formation of Schottky barriers based on InAlAs.

Keywords: Schottky barrier, InAlAs, Pt, ion etching, current-voltage characteristic, thermoelectronic emission

For citation: Genze I.Yu., Aksenov M.S., Paramonova M.A., Dmitriev D.V., Zhuravlev K.S. Influence of formation conditions and annealing on the parameters of Pt/InAlAs Schottky barriers [In Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 2. P. 34–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-34-39>

OCIS codes: 060.5530, 050.1590, 060.5625.

Барьеры Шоттки (БШ) на основе Pt, сформированные на поверхности широкозонных полупроводников A_3B_5 и InAlAs, в частности, активно используются для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов и фотодетекторов [1–5]. Параметры БШ (высота барьера ϕ_b , коэффициент идеальности n) и его однородность определяют рабочие характеристики и долговременную стабильность данных приборов [1–5].

Наиболее важным параметром при формировании БШ является высота энергетического барьера, которая зависит от качества полупроводниковой поверхности, её предварительной химической подготовки, используемого металла при формировании контакта и параметров отжига. К настоящему времени из-за хороших

адгезионных свойств и низкого коэффициента диффузии широкое распространение получили БШ с использованием Ti. Наибольшие значения ϕ_b для барьеров Шоттки Ti/InAlAs составляют 0,71–0,74 эВ [6]. Для увеличения ϕ_b используют металлы с большей работой выхода, такие как Pt [7–14], Pd [8–10, 14], Ir [15]. Значения ϕ_b для данных БШ на основе InAlAs без отжига обычно составляют 0,72–0,82 эВ. Наибольшая ϕ_b (1,09 эВ) была достигнута для Pt в комбинации с ионной очисткой и кратковременным (20 с) отжигом [7]. При этом отжиг вплоть до 400 °C не оказывает влияние на ϕ_b при использовании жидкостной обработки в растворе HF [7]. Однако в работе [8] показано, что отжиг Pt/InAlAs БШ в течение 1 мин в диапазоне от 300 °C до 400 °C приводит

к увеличению ϕ_b на 0,05 эВ до значений 0,8 эВ. При этом способ подготовки поверхности не уточняется. Влияние времени отжига на электрофизические характеристики, однородность и структурные свойства данных контактов не изучалось. Таким образом, к настоящему моменту из-за нехватки экспериментальных данных отсутствует однозначное понимание механизма влияния отжига на параметры БШ на основе Pt/InAlAs.

Цель данной работы – установить степень влияния предварительной ионной очистки поверхности InAlAs и отжига на параметры (высоту барьера и коэффициент идеальности) Au/Pt/Ti/Pt/i(n)-In_{0,52}Al_{0,48}As(001) барьеров Шоттки.

Особенности формирования используемых мезоструктур и омического контакта подробно представлены в работе [6]. Мезоструктура пассивировалась слоем Si₃N₄ толщиной 150 нм (250 °С). БШ диаметром 45 мкм изготавливались напылением слоёв Au/Pt/Ti/Pt (200/10/40/12 нм) на поверхность InAlAs с разной подготовкой. В первом случае применялась жидкостная обработка в растворе HCl:H₂O = 1:10 в течение 15 с, во втором – проводилась дополнительная очистка поверхности InAlAs ионами Ar⁺ (100 эВ) непосредственно перед напылением металлов в вакуумной камере. Отжиг в формовочном газе (95% N₂, 5% H₂) при температурах 300, 350

и 400 °С проводился на установке STE RTA 100 со скоростью нагрева 23–25 °С/с.

Вольтамперные характеристики (ВАХ), сформированных БШ, измерялись в темноте при комнатной температуре с помощью анализатора Agilent B1500A. Анализ прямой ветви ВАХ и определение величин ϕ_b и n проводились в рамках теории термоэлектронной эмиссии [17] с использованием значения константы Ричардсона A^* , равной 10,1 А/(см²·К²) [6].

На рис. 1 в полулогарифмическом масштабе представлены ВАХ для Pt/InAlAs БШ, сформированных после ионной (а) и жидкостной (б) обработок, в зависимости от времени отжига при 400 °С продолжительностью до 16 мин.

На рис. 2 приведены расчётные значения параметров ϕ_b (а) и n (б) для БШ, сформированных после ионной и жидкостной (сплошные и пунктирные линии) обработок поверхности в зависимости от квадратного корня времени отжига ($t^{1/2}$) при температурах 300 °С (кривая 1), 350 °С (кривая 2) и 400 °С (кривая 3).

Для БШ с жидкостной очисткой наблюдается достаточно большой разброс параметров до отжига, их значения находятся в диапазоне 0,71–0,75 эВ и 1,4–1,53 для ϕ_b и n , соответственно. Вероятнее всего, это связано с неоднородностями, вызванными процессами жидкостного химического травления и обработки, а также повторным окислением поверхности InAlAs во время загрузки образцов

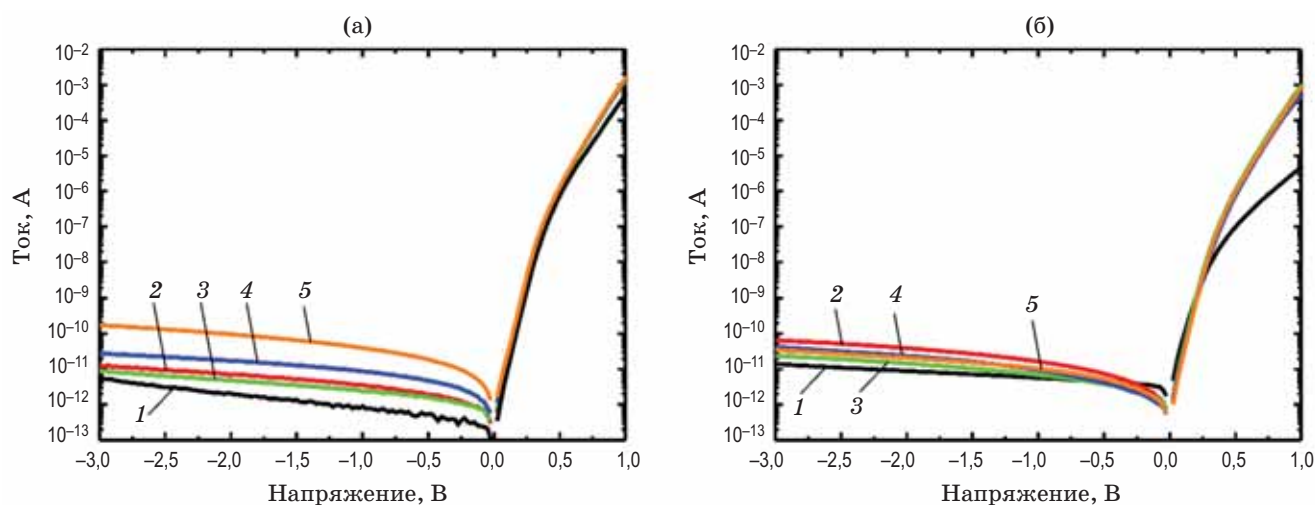


Рис. 1. ВАХ Pt/InAlAs БШ, сформированных после ионной (а) и жидкостной (б) обработок, до (кривая 1) и после 1, 4, 9 и 16 мин отжига при температуре 400 °С (кривые 2–5)

Fig. 1. Characteristics of Pt/InAlAs SBs formed after ion (a) and liquid (б) treatments, before (curve 1) and after 1, 4, 9 and 16 min of annealing at a temperature of 400 °С (curve 2–5)

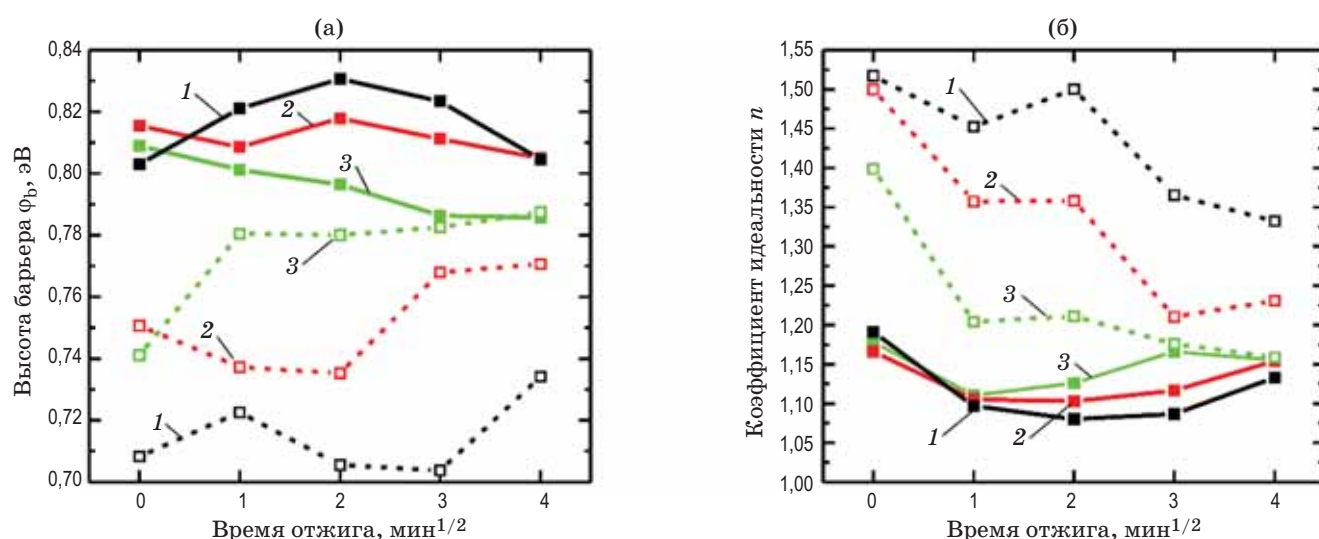


Рис. 2. Графики $\phi_b - t^{1/2}$ (а) и $n - t^{1/2}$ (б) для температур отжига 300 °С (кривая 1), 350 °С (кривая 2) и 400 °С (кривая 3) для Pt/InAlAs БПШ, сформированных после ионной (сплошные линии) и жидкостной обработок (пунктирные линии)

Fig. 2. $\phi_b - t^{1/2}$ (a) and $n - t^{1/2}$ (b) plots for annealing temperatures of 300 °C (curve 1), 350 °C (curve 2) and 400 °C (curve 3) for Pt/InAlAs SBs formed after ion (solid lines) and liquid treatments (dashed lines)

в камеру напыления металлов. Вследствие отжига происходит ступенчатое увеличение ϕ_b . При этом характерные (активационные) времена уменьшаются с увеличением температуры отжига: 16 мин для 300 °С, 9 мин для 350 °С и 1 мин для 400 °С (рис. 2а). Величины изменений ϕ_b при этом для всех температур составляют 0,03–0,04 эВ. Наибольшие значения ϕ_b составляют 0,77–0,787 эВ. В зависимостях $n - t^{1/2}$ также наблюдается ступенчатое изменение значений n , которые уменьшаются на 0,2–0,25 для всех температур после 16 мин отжига (рис. 2б).

В случае только жидкостной обработки Pt осаждается на поверхность, покрытую слоем собственного оксида [6], который, по всей видимости, и определяет электронные свойства и положение уровня Ферми на границе раздела, а вместе с этим и высоту потенциального барьера. Высокие значения n (1,4–1,52), также могут быть связаны с переходным оксидным слоем [7, 16]. Увеличение ϕ_b и уменьшение n после отжига в случае жидкостной обработки может быть связано с диффузией Pt через оксид InAlAs и формированием контакта с неокисленным полупроводником [12].

БПШ после ионной очистки изначально имеют существенно меньший разброс параметров и характеризуются большими значениями

ϕ_b (0,8–0,82 эВ) и меньшими значениями n (1,16–1,2). Для 300 °С отжига наблюдается куполообразная зависимость ϕ_b с максимумом (0,83 эВ) при 4 мин с последующим уменьшением до изначального значения 0,8 эВ. При 350 °С ϕ_b практически не изменяется, а в результате 400 °С отжига происходит уменьшение ϕ_b на 0,03 эВ (рис. 2а). Наименьшее значение n (1,08) наблюдается после 4 мин отжига при температуре 300 °С (рис. 2б).

Уменьшение разброса и улучшение параметров БПШ в случае использования ионной очистки может быть связано с удалением остаточного слоя собственного оксида и формированием плотного контакта Pt/InAlAs. Опираясь на литературные данные по металл/ A_3As БПШ [6, 17, 18], можно предположить, что улучшение параметров (ϕ_b , n) при кратковременных (1–2 мин) отжигах может быть связано с образованием тонкого однородного переходного слоя $PtAs_2$ на границе раздела. Ухудшение параметров при увеличении времени отжига, вероятнее всего, связано с процессами диффузии и сегрегации вблизи границы раздела [6, 12, 17].

Таким образом, в работе путём анализа ВАХ в рамках теории термоэлектронной эмиссии изучено влияние времени (0–16 мин) отжига при температурах 300–400 °С на па-

параметры Pt/i(n)-InAlAs БШ, сформированных после очистки ионами Ar (100 эВ) или жидкостной обработки поверхности InAlAs. Показано, что применение ионной очистки перед формированием БШ уменьшает статистический разброс параметров БШ, а также существенно увеличивает высоту энергетического барьера и уменьшает коэффициент идеальности. В случае образцов с ионной очисткой для всех температур положительный эффект достигается только при кратко-

временном (1–4 мин) отжиге. Максимальная высота барьера (0,83 эВ) и минимальный коэффициент идеальности (1,08) были получены для отжига при 300 °С в течение 4 мин. Для образцов с жидкостной обработкой отжиг оказывает положительный эффект на параметры БШ во всех диапазонах изученных времён и температур. Максимальная высота барьера (0,787 эВ) и минимальный коэффициент идеальности (1,18) наблюдались после 400 °С отжига в течение 16 мин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Muhamd R., Yahia I.S., Zahran H.Y. Phase separation induced Schottky barrier height change in InAlAs/InP heterostructure-based HEMT devices // *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2022. V. 11. № 7. P. 075001. <https://doi.org/10.1149/2162-8777/ac7dc4>
2. Chakraborty S., Kim T.-W. Comprehensive Schottky barrier height behavior and reliability instability with Ni/Au and Pt/Ti/Pt/Au on AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors // *Micromachines.* 2022. V. 13. № 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/mi13010084>
3. Ran J., He R., Wang L., Liu B., Ji X., Sun J., Wang J., Li J., Wei T. Improved barrier homogeneity in Pt/Al_{0.75}Ga_{0.25}N Schottky barrier diodes by graphene in-terlayer // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2022. V. 55. № 30. P. 304001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac6c5f>
4. Efeoglu H., Turut A. Thermal sensing capability and current-voltage-temperature characteristics in Pt/n-GaP/Al/Ti Schottky diodes // *J. Vac. Sci. Technol. B* 2023. V. 41. P. 022207. <https://doi.org/10.1116/6.0002411>
5. Chizh A.L., Mikitchuk K.B., Zhuravlev K.S., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Valisheva N.A., Aksenov M.S., Gilinsky A.M., Chistokhin I.B. High-power high-speed Schottky photodiodes for analog fiber-optic microwave signal transmission lines // *Tech. Phys. Lett.* 2019. V. 45. № 7. P. 739–741. <https://doi.org/10.1134/S1063785019070204>
6. Aksenov M.S., Genze I.Y., Chistokhin I.B., Zakirov E.R., Dmitriev D.V., Zhuravlev K.S., Gulyashov O.V., Tereshchenko O.E. Annealing effect on the barrier characteristics and interface properties of Au/Pt/Ti/n-InAlAs Schottky contacts // *Surf. Interfaces.* 2023. V. 39. P. 102920. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102920>
7. Fricke A., Stareev G., Kummert T., Sowada D., Mahnss J., Kowalsky W., Ebeling K. 1.09-eV Schottky barrier height of nearly ideal Pt/Au contacts directly deposited on *n*- and *p*⁺*n*- Al_{0.48}In_{0.52}As layers // *Appl. Phys. Lett.* 1994. T. 65. P. 755–757. <https://doi.org/10.1063/1.112221>
8. Mahajan A., Arafa M., Fay P., Caneau C., Adesida I. Enhancement-mode High Electron Mobility Transistors (E-HEMT's) Lattice-Matched to InP // *IEEE.* 1998. T. 45. №. 12. P. 2422-2429. <https://doi.org/10.1109/16.735718>
9. Harada N., Kuroda S., Hikosaka K. Pt-based gate enhancement-mode InAlAs/InGaAs HEMT's for large-scale integration // *Proc. 3rd Int. Conf. InP and Related Materials.* 1991. P. 377–380. <https://doi.org/10.1109/ICIPRM.1991.147394>
10. Sadwick L.P., Kim C.W., Tan K.L., Streit D.C. Schottky barrier heights of *n*-type and *p*-type Al_{0.48}In_{0.52}As // *IEEE.* 1991. T. 12. P. 626–628. <https://doi.org/10.1109/55.119219>
11. Gao W., Berger P.R., Hunsperger R.G., Zydzik G., Rhodes W.W., O'Bryan H.M., Sivco D., Cho A.Y. Transparent and opaque Schottky contacts on undoped In_{0.52}Al_{0.48}As grown by molecular beam epitaxy // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 66. № 25. P. 3471–3473. <https://doi.org/10.1063/1.113767>
12. Kim S., Adesida I., Hwang H. Measurements of thermally induced nanometer-scale diffusion depth of Pt/Ti/Pt/Au gate metallization on InAlAs/InGaAs high-electron-mobility transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2005. T. 87. P. 232102. <https://doi.org/10.1063/1.2137687>
13. Amano M., Fujita S., Hosoi S., Noda T., Sasaki A., Ashizawa Y. InAlAs/InGaAs HEMT using InGaP Schottky contact layer // *Seventh International Conference on Indium Phosphide and Related Materials.* IEEE. 1995. P. 416–419. <https://doi.org/10.1109/ICIPRM.1995.522168>
14. Chuang H.F., Lee C.P., Tsai C.M., Liu D.C., Tsang J.S., Fan J.C. Thermal annealing of Pd/InAlAs Schottky contacts for transistor buried-gate technologies // *J. Appl. Phys.* 1998. V. 83. №. 1. P. 366–371. <https://doi.org/10.1063/1.366692>
15. Wang L., Zhao W., Adesida I. Correlating the Schottky barrier height with the interfacial reactions of Ir gates for InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors // *Appl. Phys. Lett.* 2006. V. 89. № 21. P. 211910. <https://doi.org/10.1063/1.2393005>
16. Rhoderick E.H., Williams R.H. *Metal-semiconductor contacts.* Oxford: Clarendon press, 1988. P. 129.
17. Wang L., Adesida I. Schottky barrier characteristics and interfacial reactions of Ti on *n*-In_{0.52}Al_{0.48}As // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 91. P. 022110. <https://doi.org/10.1063/1.2756313>
18. Fontaine C., Okumura T., Tu K. N. Interfacial reaction and Schottky barrier between Pt and GaAs // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54. P. 1404. <https://doi.org/10.1063/1.332165>

АВТОРЫ

Илья Юрьевич Гензе — аспирант, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 58223184900; <https://orcid.org/0009-0004-0605-0620>; genze@isp.nsc.ru

Максим Сергеевич Аксенов — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 55965556500; <https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>; aksenov@isp.nsc.ru

Мария Алексеевна Парамонова — студент, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, 630090, Россия; <https://orcid.org/0009-0000-8170-2773>; m.paramonova@g.nsu.ru

Дмитрий Владимирович Дмитриев — младший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 56260407500; <https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>; ddmitriev@isp.nsc.ru

Константин Сергеевич Журавлёв — доктор физ.-мат. наук, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, 630090, Россия; Scopus ID: 7005806378; <https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>; zhur@isp.nsc.ru

AUTHORS

Ilya Yu. Genze — PhD student, Institute of Semiconductor Physics named after. A.V. Rzhhanov Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 58223184900; <https://orcid.org/0009-0004-0605-0620>; genze@isp.nsc.ru

Maxim S. Aksenov — PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Institute of Semiconductor Physics named after. A.V. Rzhhanov Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 55965556500; <https://orcid.org/0000-0002-5660-6904>; aksenov@isp.nsc.ru

Maria A. Paramonova — Student, Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia; <https://orcid.org/0009-0000-8170-2773>; m.paramonova@g.nsu.ru

Dmitry V. Dmitriev — Junior Researcher, Institute of Semiconductor Physics named after. A.V. Rzhhanov Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 56260407500; <https://orcid.org/0000-0001-7126-5338>; ddmitriev@isp.nsc.ru

Konstantin S. Zhuravlev — Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Institute of Semiconductor Physics named after. A.V. Rzhhanov Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090, Russia; Scopus ID: 7005806378; <https://orcid.org/0000-0002-3171-5098>; zhur@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2023
Одобрена после рецензирования 10.11.2023
Принята к печати 29.12.2023

The article was submitted to the editorial office 28.10.2023
Approved after review 10.11.2023
Accepted for publication 29.12.2023