

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ β -Ga₂O₃ И ДРУГИХ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Рожков¹, Е.С. Колодезный^{1*}, А.М. Смирнов¹, В.Е. Бугров¹, А.Е. Романов^{1,2}

¹ Университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, 197101, С.-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Политехническая ул. 26, 194021, С.-Петербург, Россия

*e-mail: e.kolodeznyy@gmail.com

Аннотация. Проведен теоретический анализ и компьютерное моделирование электрических характеристик диода Шоттки (ДШ) Au/ β -Ga₂O₃. Показано, что высота барьера Шоттки Au/ β -Ga₂O₃ составляет 1.23 эВ и напряжение открытия ~ 0.6 В при токе ~ 1 мкА. Проведено сравнение характеристик ДШ на основе β -Ga₂O₃ и других конкурирующих широкозонных полупроводников: 4H-SiC, AlGa₂N, GaN. Показано, что ДШ Au/ β -Ga₂O₃ имеет меньший обратный ток по сравнению с Au/GaN и Ni/SiC, а рассчитанное напряжение пробоя у ДШ Au/ β -Ga₂O₃ составляет 2513 В.

1. Введение

Моноклинный оксид галлия (β -Ga₂O₃) – это широкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны ~ 4.9 эВ [1]. Материал представляет интерес для использования в газовых сенсорах [2, 3], ультрафиолетовых фотоприемниках [4] и силовых приборах [5]. β -Ga₂O₃ является идеальным полупроводником для использования в силовых диодах, поскольку по сравнению с 4H-SiC и GaN, он обладает большей шириной запрещенной зоны и большим напряжением пробоя [5, 6]. β -Ga₂O₃ является прозрачным для электромагнитного излучения с длиной волны более 280 нм, что обуславливает возможность его применения в солнечно-слепых фотоприемниках [7]. Основным преимуществом по сравнению с полупроводниками AlGa₂N и MgZnO, используемыми в настоящее время в фотоприемниках, является возможность получения монокристаллов β -Ga₂O₃ методом Чохральского путем вытягивания из расплава [8], методом зонной плавки [9] или путем выращивания из собственного расплава [10]. Низкая стоимость получения β -Ga₂O₃ является дополнительным стимулом для исследования электронных приборов его основе.

Для развития компонентной базы на основе β -Ga₂O₃ необходимо изучение и оптимизация такого важного прибора, как диод Шоттки (ДШ). Первые ДШ с использованием β -Ga₂O₃ были получены в работах [4, 11-14]. ДШ с различными металлическими контактами из Au, Pt/Ti/Au и Cu были исследованы в работах [4, 5, 13, 14]. Эффективная высота барьера была порядка 1.2 эВ, и коэффициент неидеальности был в диапазоне 1.02 – 1.1 [4]. Исследуемые образцы ДШ содержали эпитаксиальные слои β -Ga₂O₃ n-типа с концентрацией доноров от $3 \cdot 10^{16}$ до $6 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Подвижность электронов для концентраций от 10^{15} до 10^{16} см⁻³ составляла 300 см²/(В·с) [15].

В настоящей работе проведено сравнение электрических характеристик ДШ на

основе β -Ga₂O₃ и конкурирующих полупроводниковых материалов, таких как GaN, 4H-SiC, AlGaIn.

2. Описание модели и теоретический анализ

Энергетическая диаграмма ДШ Au/ β -Ga₂O₃ представлена на Рис. 1. Для расчета электрических характеристик ДШ применялась термоэмиссионно-диффузионная теория [16], учитывающая электрон-фононное взаимодействие, квантовомеханическое туннелирование носителей через барьер и уменьшение высоты барьера под влиянием сил изображения.

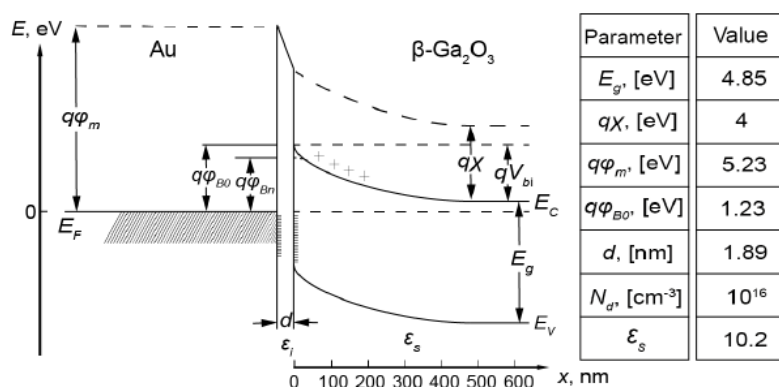


Рис. 1. Схематическое изображение энергетической диаграммы для ДШ Au/ β -Ga₂O₃.

В Таблице 1 представлены параметры материалов, необходимые для компьютерного моделирования (КМ) ДШ, значения взяты из работ [8, 13, 17-25]. Параметры Al_{0.2}Ga_{0.8}N вычислены по правилу Вегарда с учетом нелинейной зависимости ширины запрещенной зоны от состава твердого раствора [26].

Таблица 1. Параметры материалов.

Параметр	β -Ga ₂ O ₃	GaN	Al _{0.2} Ga _{0.8} N	4H-SiC
Ширина запрещенной зоны, E_g , эВ	4.85	3.42	3.84	3.23
Диэлектрическая проницаемость, ϵ_s	10.2	8.9	8.82	9.7
Средство электронов, $q\chi$, эВ	4	4.1	3.4	3.7
Плотность состояний в зоне проводимости, N_c , 1/см ³	$3.72 \cdot 10^{18}$	$2.23 \cdot 10^{18}$	$2.17 \cdot 10^{18}$	$1.7 \cdot 10^{19}$
Плотность состояний в валентной зоне, N_v , 1/см ³	$3.49 \cdot 10^{18}$	$4.62 \cdot 10^{19}$	$2.76 \cdot 10^{19}$	$2.5 \cdot 10^{19}$
Подвижность электронов, μ_e , см ² /В·с	300	1000	199	1000
Подвижность дырок, μ_h , см ² /В·с	-	200	15.67	115
Эффективная константа Ричардсона, A^* , А/К ² ·см ²	33.4	24	25	34.8

Прямая и обратная ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) для умеренно легированных полупроводников описываются следующими формулами [16]:

$$J_F = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{q(\Delta\phi + V)}{kT}\right), \quad J_R = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV_R}{kT}\right)\right], \quad (1, 2)$$

где T – температура, [K]; V – приложенное напряжение, [В]; q – элементарный электрический заряд, [Кл]; V_R – обратное напряжение, [В]; k – постоянная Больцмана, [Дж/К]; $q\Delta\phi$ – понижение барьера Шоттки, [эВ]; $q\phi_{B0}$ – величина барьера Шоттки, [эВ]; $q\phi_B$ – эффективная величина барьера Шоттки, [эВ];

$$\varphi_B = \varphi_{B0} - (qE_{max} / 4\pi\epsilon_s)^{0.5} - \alpha E_{max}, \quad (3)$$

где $\varphi_{B0} = \varphi_m - \chi$; φ_m – работа выхода электрона из металла, [эВ]; α – отношение приращения электростатического барьера к приращению максимального значения электрического поля, [м]; E_{max} – максимальная величина напряженности электрического поля, [В/м]:

$$E_{max} = \sqrt{2qN_d \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{q} \right) / \epsilon_s}, \quad (4)$$

где qV_{bi} – высота потенциального барьера при нулевом смещении, [эВ].

Прямая ветвь ВАХ идеального ДШ описывается формулой (1), но поскольку реальные значения тока меньше идеальных, то для учета этой разницы вводится коэффициент неидеальности n [13, 16]:

$$J_F = A * T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{B0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right]. \quad (5)$$

3. Компьютерное моделирование

Для КМ ВАХ, концентрации носителей заряда, распределения электрических полей и т.д. в программном пакете COMSOL Multiphysics решалось электростатическое уравнение Пуассона совместно с уравнениями переноса заряда, связывающими концентрацию носителей заряда и электрическое поле. В пределе, где статистика Ферми-Дирака может быть аппроксимирована распределением Больцмана, подвижности, и коэффициенты диффузии описывались уравнениями Эйнштейна. Итоговая система уравнений имела следующий вид:

$$\nabla \cdot (\epsilon_s \nabla \varphi) = q(n_h - n_e + N_d), \quad (6)$$

$$q^{-1} \nabla \cdot \mathbf{j}_e = -V, \quad q^{-1} \nabla \cdot \mathbf{j}_h = -V, \quad (7)$$

$$\mathbf{j}_e = -qn_e \mu_e \nabla \phi + qD_e \nabla n_e, \quad \mathbf{j}_h = -qn_h \mu_h \nabla \phi + qD_h \nabla n_h, \quad (8)$$

$$n_e \propto \exp[-(-q)\phi / kT], \quad n_h \propto \exp[-q\phi / kT], \quad (9)$$

$$D_{e,h} = \mu_{e,h} kT / q. \quad (10)$$

Модель ДШ (Рис. 2) представляла собой цилиндр радиусом $R = 2.5$ мм, состоящий из трех слоев: легированного слоя β -Ga₂O₃ высотой $h = 250$ мкм, контакта Шоттки из Au и омического контакта.

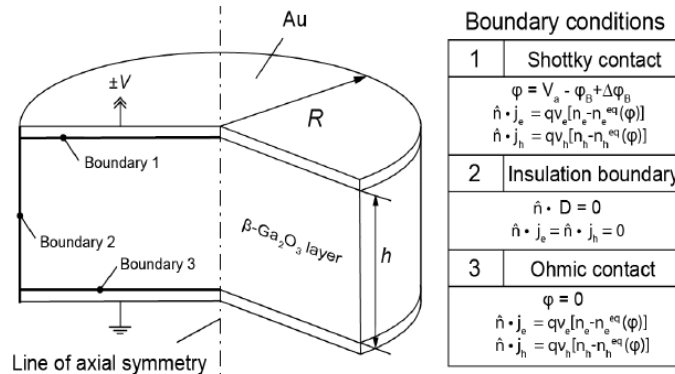


Рис. 2. Модель ДШ Au/ β -Ga₂O₃ и выбранные для нее граничные условия.

Граничные условия задавались между металлическими контактами и слоем β -Ga₂O₃ и на боковой поверхности цилиндра (Рис. 2).

4. Результаты

Прямые ветви ВАХ, полученные в результате численного решения системы уравнений (6)-(10) и аналитического решения по формулам (1) и (5), для ДШ Au/ β -Ga₂O₃, Au/GaN, Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N, Ni/4H-SiC совпадают в области от 0 до ~ 0.9 В (Рис. 3). При больших уровнях инжекции термоэмиссионно-диффузионная теория в отличие от КМ не учитывает влияние конечного сопротивления ДШ, поэтому прямая ветвь, полученная в результате КМ, становится неэкспоненциальной при $V > 0.9$ В. Получены электрические характеристики ДШ Au/ β -Ga₂O₃: $q\phi_{B0} = 1.23$ эВ, напряжение открытия ~ 0.6 В при токе ~ 1 мкА. Прямой ток при $V = 1$ В по теоретической оценке равен 2.5 А, а по результатам КМ – 0.026 А. По экспериментальным данным [13, 14] при $V = 1$ В ток ~ 0.01 А, поэтому можно считать, что при больших уровнях инжекции КМ более полно описывает характеристики реальных ДШ. Барьеры Шоттки для остальных ДШ оказались следующими: Au/GaN – 1.13 эВ, Ni/4H-SiC – 1.1 эВ, Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N – 1.4 эВ, а напряжения открытия ДШ: Au/GaN – 0.6 В, Ni/4H-SiC – 0.6 В, Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N – 0.8 В.

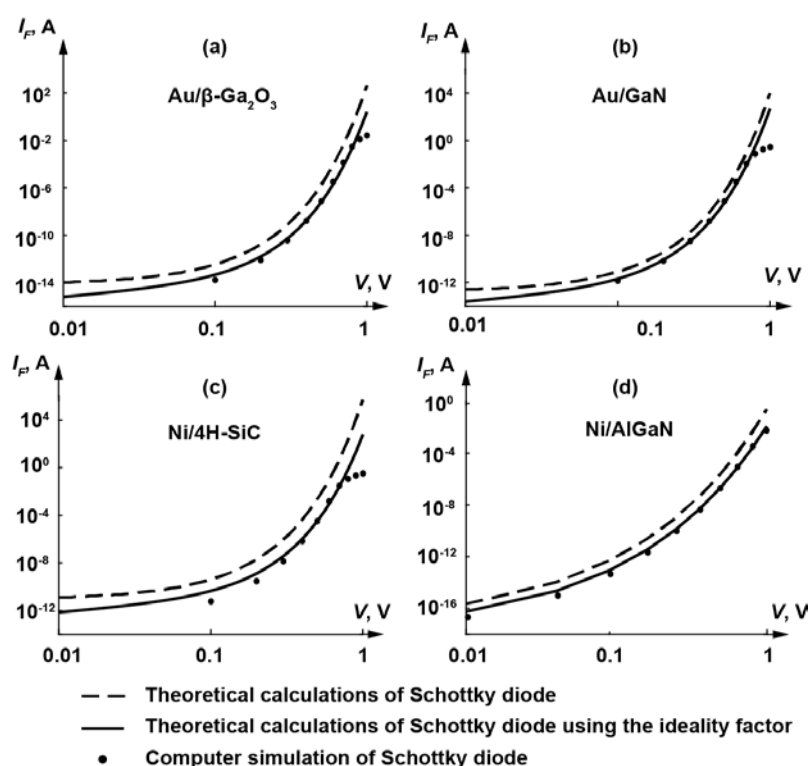


Рис. 3. Прямые ветви ВАХ для ДШ: а) Au/ β -Ga₂O₃, б) Au/GaN, в) Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N, г) Ni/4H-SiC.

Напряжение пробоя ДШ описывается следующей формулой [16]:

$$V_b = \frac{\epsilon_s E_{max}^2}{2qN_d}. \quad (11)$$

В результате применения соотношений (4) и (11) были получены напряжения пробоя ДШ: V_b (Au/ β -Ga₂O₃) = 2513 В; V_b (Au/GaN) = 1394 В; V_b (Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N) = 3632 В; V_b (Ni/4H-SiC) = 1123 В. Полученные напряжения пробоя ДШ согласуются с обратным ветвям ВАХ, рассчитанными по формулам (2) и (3) (Рис. 4). V_b (Au/ β -Ga₂O₃)

меньше, чем V_b (Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N), потому что высота барьера Шоттки для Au/β-Ga₂O₃ ($q\phi_{B0} = 1.23$ эВ), меньше, чем у Ni/Al_{0.2}Ga_{0.8}N ($q\phi_{B0} = 1.4$ эВ).

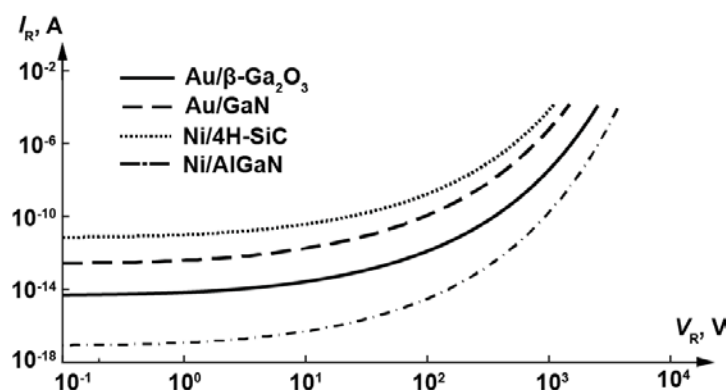


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ для различных ДШ, рассчитанные по формулам (2) и (3).

5. Выводы

В результате теоретического анализа и КМ ДШ Au/β-Ga₂O₃ было показано, что высота барьера Шоттки составляет 1.23 эВ, напряжение открытия ~ 0.6 В при токе ~ 1 мкА. При больших уровнях инжекции КМ более точно описывает поведение реальных ДШ, так по результатам КМ $I_F = 0.026$ А при $V = 1$ В. Напряжение пробоя ДШ Au/β-Ga₂O₃ составляет 2513 В, обратный ток для диода выбранной геометрии – 10^{-14} А. Анализ обратных ветвей ВАХ говорит о том, что ДШ Au/β-Ga₂O₃ имеет меньший обратный ток и большее напряжение пробоя, чем Au/GaN и Ni/SiC. Хотя ДШ Ni/AlGaN имеет наименьший обратный ток и обладает наибольшим напряжением пробоя.

Настоящее исследование поддержано Российским научным фондом (Грант РНФ №14-29-00086).

Авторы выражают благодарность Степанову С.И. и Николаеву В.И. за обсуждение результатов.

Литература

- [1] Y. Oshima, E.G.Víllora, Y. Matsushita, S. Yamamoto, K. Shimamura // *Journal of Applied Physics* **118** (2015) 085301.
- [2] M. Fleischer, L. Höllbauer, H. Meixner // *Sensors and Actuators B* **18** (1994) 119.
- [3] Y. Chen, C. Zhu, X. Shi, M. Cao, H. Jin // *Nanotechnology* **19** (2008) 205603.
- [4] R. Suzuki, S. Nakagomi, Y. Kokubun, N. Arai, S. Ohira // *Applied Physics Letters* **94** (2009) 222102.
- [5] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, S. Yamakoshi // *Physica Status Solidi A* **211** (2014) 21.
- [6] O. Seok, W. Ahn, M. K. Han, M. W. Ha // *Journal of Vacuum Science & Technology B* **31** (2013) 011203.
- [7] N. Ueda, H. Hosono, R. Waseda, H. Kawazoe // *Applied Physics Letters* **70** (1997) 3561.
- [8] Z. Galazka, R. Uecker, K. Irmischer, M. Albrecht, D. Klimm, R. Fornari, M. Pietsch // *Crystal Research and Technology* **45** (2010) 1229.
- [9] S. Ohira, M. Yoshioka, T. Sugawara, K. Nakajima, T. Shishido // *Thin Solid Films* **496** (2006) 53.
- [10] V.N. Maslov, V.M. Krymov, M.N. Blashenkov, A.A. Golovatenko, V.I. Nikolaev // *Technical Physics Letters* **40** (2014) 303.
- [11] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, S. Fujita // *Applied Physics Express* **1** (2008) 011202.

- [12] K. Irmscher, Z. Galazka, M. Pietsch, R. Uecker, R. Fornari // *Journal of Applied Physics* **110** (2011) 063720.
- [13] M. Mohamed, K. Irmscher, C. Janowitz, Z. Galazka, R. Manzke, R. Fornari // *Applied Physics Letters* **101** (2012) 132106.
- [14] K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui, S. Yamakoshi // *Journal of Crystal Growth* **378** (2013) 591.
- [15] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. G. Villora, K. Shimamura, S. Yamakoshi // *Applied Physics Express* **5** (2012) 035502.
- [16] S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices* (John Wiley & Sons, 1981).
- [17] *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001).
- [18] L. Patrick, W. J. Choyke // *Physical Review B* **2** (1970) 2255.
- [19] W.E. Nelson, F.A. Holder, A. Rosenbloom // *Journal of Applied Physics* **37** (1966) 333.
- [20] S. Nishino, J. A. Powell, H. A. Will // *Applied Physics Letters* **42** (1983) 460.
- [21] A.T Collins, E.C. Lightowers, P.J. Dean // *Physical Review* **158** (1967) 833.
- [22] Q. Guo, A. Yoshida // *Japanese Journal of Applied Physics* **33** (1994) 2453.
- [23] V.W.L. Chin, T.L. Tansley, T. Osotchan // *Journal of Applied Physics* **75** (1994) 7365.
- [24] J. Edwards, K. Kawabe, G. Stevens, R. Tredgold // *Solid State Communications* **3** (1965) 99.
- [25] M. Passlack, N. Hunt, E. Schubert, G. Zydzik, M. Hong, J.P. Mannaerts, R. Fischer // *Applied Physics Letters* **64** (1994) 2715.
- [26] G. Steude, D. Hofmann, B. Meyer, H. Amano, I. Akasaki // *Physica Status Solidi B* **205** (1998) R7.

COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODES BASED ON β -Ga₂O₃ AND OTHER WIDE BANDGAP SEMICONDUCTORS

M.A. Rozhkov¹, E.S. Kolodezny^{1*}, A.M. Smirnov¹, V.E. Bougrov¹, A.E. Romanov^{1,2}

¹ITMO University, Kronverkskiy 49, 197101, Saint Petersburg, Russia

² Ioffe Physical Technical Institute, Polytechnicheskaya 26, 194021, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: e.kolodeznyy@gmail.com

Abstract. Electrical characteristics of Schottky diode (SD) Au/ β -Ga₂O₃ were analyzed both theoretically and with the use of finite element method. It was shown that Schottky barrier height for Au/ β -Ga₂O₃ is 1.23 eV and threshold voltage is ~ 0.6 V with current ~ 1 μ A. Comparative analysis of the properties of SD Au/ β -Ga₂O₃ and devices based on various wide bandgap semiconductors including 4H-SiC, GaN and AlGaN has been performed. We demonstrated that SD Au/ β -Ga₂O₃ had smaller reverse current than Au/GaN and Ni/4H-SiC. Calculated breakdown voltage for SD Au/ β -Ga₂O₃ was 2513 V.

Acknowledgment

The Russian Scientific Foundation (Grant RSF № 14-29-00086) has supported this research. The authors are grateful to S.I. Stepanov and V.I. Nikolaev for helpful discussions.

References

- [1] Y. Oshima, E.G.Víllora, Y. Matsushita, S. Yamamoto, K. Shimamura // *Journal of Applied Physics* **118** (2015) 085301.
- [2] M. Fleischer, L. Höllbauer, H. Meixner // *Sensors and Actuators B* **18** (1994) 119.
- [3] Y. Chen, C. Zhu, X. Shi, M. Cao, H. Jin // *Nanotechnology* **19** (2008) 205603.
- [4] R. Suzuki, S. Nakagomi, Y. Kokubun, N. Arai, S. Ohira // *Applied Physics Letters* **94** (2009) 222102.
- [5] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, S. Yamakoshi // *Physica Status Solidi A* **211** (2014) 21.
- [6] O. Seok, W. Ahn, M. K. Han, M. W. Ha // *Journal of Vacuum Science & Technology B* **31** (2013) 011203.
- [7] N. Ueda, H. Hosono, R. Waseda, H. Kawazoe // *Applied Physics Letters* **70** (1997) 3561.
- [8] Z. Galazka, R. Uecker, K. Irmischer, M. Albrecht, D. Klimm, R. Fornari, M. Pietsch // *Crystal Research and Technology* **45** (2010) 1229.
- [9] S. Ohira, M. Yoshioka, T. Sugawara, K. Nakajima, T. Shishido // *Thin Solid Films* **496** (2006) 53.
- [10] V.N. Maslov, V.M. Krymov, M.N. Blashenkov, A.A. Golovatenko, V.I. Nikolaev // *Technical Physics Letters* **40** (2014) 303.
- [11] T. Oshima, T. Okuno, N. Arai, N. Suzuki, S. Fujita // *Applied Physics Express* **1** (2008) 011202.
- [12] K. Irmischer, Z. Galazka, M. Pietsch, R. Uecker, R. Fornari // *Journal of Applied Physics* **110** (2011) 063720.
- [13] M. Mohamed, K. Irmischer, C. Janowitz, Z. Galazka, R. Manzke, R. Fornari // *Applied Physics Letters* **101** (2012) 132106.
- [14] K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui, S. Yamakoshi // *Journal of Crystal Growth* **378** (2013) 591.
- [15] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. G. Víllora, K. Shimamura, S. Yamakoshi // *Applied Physics Express* **5** (2012) 035502.
- [16] S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices* (John Wiley & Sons, 1981).
- [17] *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur (John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001).
- [18] L. Patrick, W. J. Choyke // *Physical Review B* **2** (1970) 2255.
- [19] W.E. Nelson, F.A. Holder, A. Rosenbloom // *Journal of Applied Physics* **37** (1966) 333.
- [20] S. Nishino, J. A. Powell, H. A. Will // *Applied Physics Letters* **42** (1983) 460.
- [21] A.T Collins, E.C. Lightowers, P.J. Dean // *Physical Review* **158** (1967) 833.
- [22] Q. Guo, A. Yoshida // *Japanese Journal of Applied Physics* **33** (1994) 2453.
- [23] V.W.L. Chin, T.L. Tansley, T. Osotchan // *Journal of Applied Physics* **75** (1994) 7365.
- [24] J. Edwards, K. Kawabe, G. Stevens, R. Tredgold // *Solid State Communications* **3** (1965) 99.
- [25] M. Passlack, N. Hunt, E. Schubert, G. Zydzik, M. Hong, J.P. Mannaerts, R. Fischer // *Applied Physics Letters* **64** (1994) 2715.
- [26] G. Steude, D. Hofmann, B. Meyer, H. Amano, I. Akasaki // *Physica Status Solidi B* **205** (1998) R7.