

# СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИОДОВ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И ДРУГИХ ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

**М.А. Рожков<sup>1</sup>, Е.С. Колодезный<sup>1\*</sup>, А.М. Смирнов<sup>1</sup>, В.Е. Бугров<sup>1</sup>, А.Е. Романов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Кронверкский пр. 49, 197101, С.-Петербург, Россия

<sup>2</sup>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/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Показано, что высота барьера Шоттки Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 1.23 эВ и напряжение открытия  $\sim 0.6$  В при токе  $\sim 1$  мА. Проведено сравнение характеристик ДШ на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и других конкурирующих широкозонных полупроводников: 4Н-SiC, AlGaN, GaN. Показано, что ДШ Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет меньший обратный ток по сравнению с Au/GaN и Ni/SiC, а рассчитанное напряжение пробоя у ДШ Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 2513 В.

## 1. Введение

Моноклинный оксид галлия ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – это широкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны  $\sim 4.9$  эВ [1]. Материал представляет интерес для использования в газовых сенсорах [2, 3], ультрафиолетовых фотоприемниках [4] и силовых приборах [5].  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является идеальным полупроводником для использования в силовых диодах, поскольку по сравнению с 4Н-SiC и GaN, он обладает большей шириной запрещенной зоны и большим напряжением пробоя [5, 6].  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 AlGaN и MgZnO, используемыми в настоящее время в фотоприемниках, является возможность получения монокристаллов  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> методом Чохральского путем вытягивания из расплава [8], методом зонной плавки [9] или путем выращивания из собственного расплава [10]. Низкая стоимость получения  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> является дополнительным стимулом для исследования электронных приборов его основе.

Для развития компонентной базы на основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> необходимо изучение и оптимизация такого важного прибора, как диод Шоттки (ДШ). Первые ДШ с использованием  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> n-типа с концентрацией доноров от  $3 \cdot 10^{16}$  до  $6 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Подвижность электронов для концентраций от  $10^{15}$  до  $10^{16}$  см<sup>-3</sup> составляла 300 см<sup>2</sup>/(В·с) [15].

В настоящей работе проведено сравнение электрических характеристик ДШ на

основе  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и конкурирующих полупроводниковых материалов, таких как GaN, 4H-SiC, AlGaN.

## 2. Описание модели и теоретический анализ

Энергетическая диаграмма ДШ Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> представлена на Рис. 1. Для расчета электрических характеристик ДШ применялась термоэмиссионно-диффузионная теория [16], учитывая электрон-фононное взаимодействие, квантовомеханическое туннелирование носителей через барьер и уменьшение высоты барьера под влиянием сил изображения.

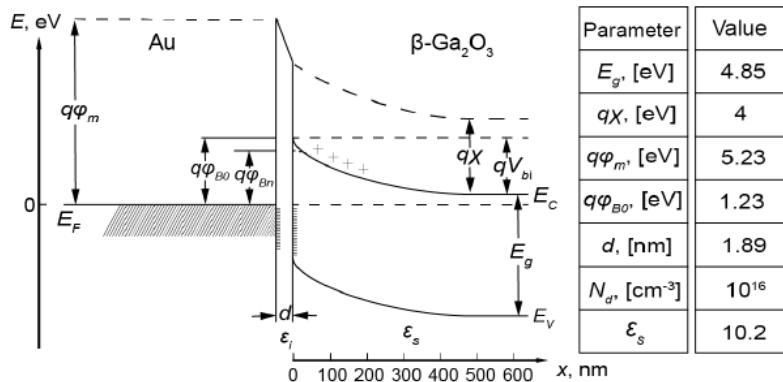


Рис. 1. Схематичное изображение энергетической диаграммы для ДШ Au/  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

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

Таблица 1. Параметры материалов.

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

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

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

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

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

где  $\varphi_{B0} = \varphi_m - \chi$ ;  $\varphi_m$  – работа выхода электрона из металла, [эВ];  $\alpha$  – 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:

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

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

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

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

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

Модель ДШ (Рис. 2) представляла собой цилиндр радиусом  $R = 2.5$  мм, состоящий из трех слоев: легированного слоя  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> высотой  $h = 250$  мкм, контакта Шоттки из Au и омического контакта.

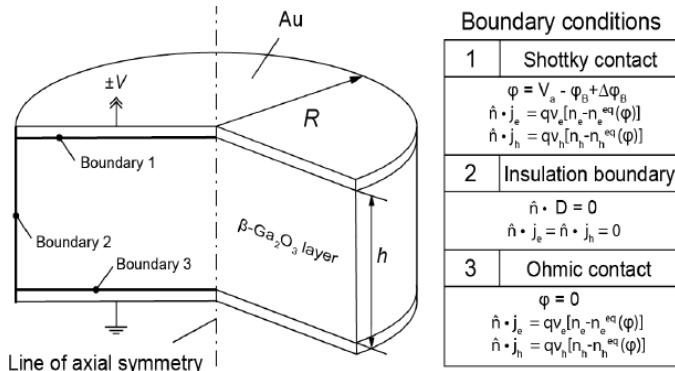
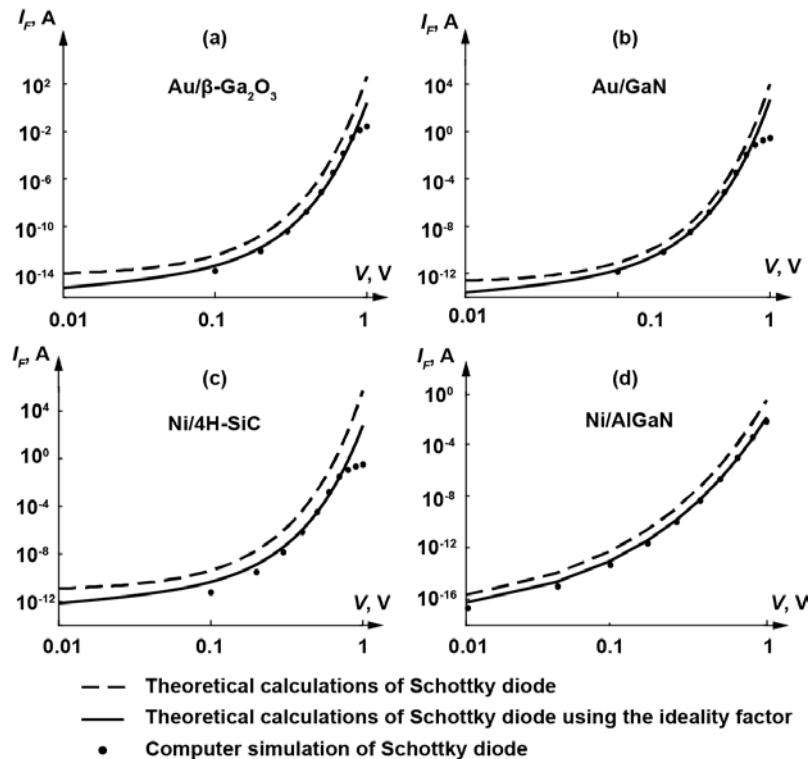


Рис. 2. Модель ДШ Au/  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и выбранные для нее граничные условия.

Границные условия задавались между металлическими контактами и слоем  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Au/GaN, Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N, Ni/4H-SiC совпадают в области от 0 до  $\sim 0.9$  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/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:  $q\varphi_{BO} = 1.23$  эВ, напряжение открытия  $\sim 0.6$  В при токе  $\sim 1$  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  $\sim 0.01$  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<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N – 1.4 эВ, а напряжения открытия ДШ: Au/GaN – 0.6 В, Ni/4H-SiC – 0.6 В, Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N – 0.8 В.



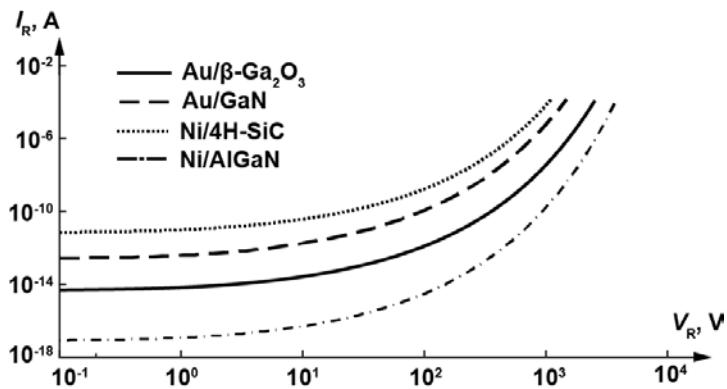
**Рис. 3.** Прямые ветви ВАХ для ДШ: а) Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, б) Au/GaN, в) Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N, г) Ni/4H-SiC.

Напряжение пробоя ДШ описывается следующей формулой [16]:

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

В результате применения соотношений (4) и (11) были получены напряжения пробоя ДШ:  $V_b$  (Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 2513 В;  $V_b$  (Au/GaN) = 1394 В;  $V_b$  (Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N) = 3632 В;  $V_b$  (Ni/4H-SiC) = 1123 В. Полученные напряжения пробоя ДШ согласуются с обратным ветвями ВАХ, рассчитанными по формулам (2) и (3) (Рис. 4).  $V_b$  (Au/ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

меньше, чем  $V_b$  (Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N), потому что высота барьера Шоттки для Au/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $q\varphi_{B0} = 1.23$  эВ), меньше, чем у Ni/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N ( $q\varphi_{B0} = 1.4$  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-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 2513 В, обратный ток для диода выбранной геометрии –  $10^{-14}$  А. Анализ обратных ветвей ВАХ говорит о том, что ДШ Au/β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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. Villora, 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. Irmscher, 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. 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.

## COMPARISON OF CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY DIODES BASED ON $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$ AND OTHER WIDE BANDGAP SEMICONDUCTORS

**M.A. Rozhkov<sup>1</sup>, E.S. Kolodeznyi<sup>1\*</sup>, A.M. Smirnov<sup>1</sup>, V.E. Bougov<sup>1</sup>, A.E. Romanov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ITMO University, Kronverkskiy 49, 197101, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Ioffe Physical Technical Institute, Polytechnicheskaya 26, 194021, Saint Petersburg, Russia

\*e-mail: e.kolodeznyi@gmail.com

**Abstract.** Electrical characteristics of Schottky diode (SD) Au/ $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  were analyzed both theoretically and with the use of finite element method. It was shown that Schottky barrier height for Au/  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  is 1.23 eV and threshold voltage is  $\sim 0.6$  V with current  $\sim 1$   $\mu\text{A}$ . Comparative analysis of the properties of SD Au/ $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  and devices based on various wide bandgap semiconductors including 4H-SiC, GaN and AlGaN has been performed. We demonstrated that SD Au/ $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  had smaller reverse current than Au/GaN and Ni/4H-SiC. Calculated breakdown voltage for SD Au/ $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  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. Irmscher, 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. 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.