

УДК 53.043

## Исследование кристаллов AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии<sup>1</sup>

<sup>1,2,3</sup> Торхов Н. А., <sup>2</sup> Новиков В. А.

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов  
Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36

<sup>3</sup> Томский университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40  
trkf@mail.ru

Получено: 8 сентября 2019 г.

Отрецензировано: 13 сентября 2019 г.

Принято к публикации: 16 сентября 2019 г.

**Аннотация:** С использованием метода зонда Кельвина АСМ экспериментально подтверждено наличие составляющей  $E^*$  электростатического поля периферии  $E_p$ , оказывающего значительное влияние на электростатическую систему AuNi/n-GaN контактов Шоттки.

**Ключевые слова:** нитрид галлия, барьер Шоттки, омический контакт, работа выхода, поверхность, метод зонда Кельвина АСМ, электрическое поле периферии.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Торхов Н. А., Новиков В. А. Исследование кристаллов AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 2. С. 216—226.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Торхов, Н. А. Исследование кристаллов AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN диодов Шоттки методами атомно-силовой микроскопии / Н. А. Торхов, В. А. Новиков // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — Т. 2, № 2. — С. 216—226.

---

<sup>1</sup> Статья является расширенной версией доклада, представленного на 29-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2019 (Севастополь, РФ, 8—14 сентября 2019 г.).

## Investigation of AuNi/n-n+-GaN crystals of Schottky diodes by atomic force microscopy

N. A. Torkhov<sup>1,2,3</sup> and V. A. Novikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices

Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A

<sup>2</sup>Tomsk State University, Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 36

<sup>3</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 40

e-mail: trkf@mail.ru

Received: September 8, 2019

Peer-reviewed: September 13, 2019

Accepted: September 16, 2019

**Abstract:** The component of electrostatic field ( $E^*$ ) of periferia (El) was found by atomic force microscopy. The  $E^*$  has a significant effect on the electrostatic system of AuNi/n-GaN Schottky contacts, that was experimentally confirmed.

**Keywords:** gallium nitride, Schottky barrier, ohmic contact, work function, surface, KPFM, peripheral electric field.

**For citation(IEEE):** N. A. Torkhov et al. “Investigation of AuNi/n-n+-GaN crystals of Schottky diodes by atomic force microscopy,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 216–226, 2019. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2019.02.2.20

### 1. Введение

Современные методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяют измерять латеральные неоднородности поверхностных потенциалов, образованных контактами металл — полупроводник (М — П) на субмикронном и наноуровнях. Это позволило прецизионно исследовать электростатическую систему плоских контактов М — П с барьером Шоттки (БШ) на основе Au/n — GaAs и обнаружить зависимость значений работы выхода электронов  $A_e = e\varphi_{Au}$  (далее — просто “работа выхода”) с поверхности барьерных Au-контактов от их линейных размеров — диаметров  $D$ . Было показано, что зависимость  $A_e$  от  $D$  обусловлена влиянием встроенного электрического поля периферии  $E_f = E_f(D)$ , которое изменяется при изменении отношения  $\xi = P/S$ , где  $P$  — периметр, а  $S$  — площадь контакта. Было найдено, что для арсенида галлия n-типа проводимости уменьшение диаметра  $D < 500$  мкм приводит к уменьшению работы выхода, а для арсенида

галлия р-типа наоборот — к ее увеличению [1, 2]. Подобные эффекты были замечены также для плоских Pt- [3] и RhPt-контактов Шоттки [4], а также для контактов Шоттки на фосфиде индия [5]. В случае отсутствия БШ, например, для структур металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) значение работы выхода электронов из анодного металлического контакта  $A_e = \text{Const}$  не зависит от его линейных размеров [1].

Для плоских контактов Шоттки на широкозонных полупроводниках подобные исследования, за исключением единичных работ, например [6], не проводились. АСМ-исследования электрической системы омических контактов (ОК) еще более ограничены. В связи с этим представляет научно-практический интерес проведение исследований электростатической системы контактов М — П на широкозонных полупроводниках таких, например, как нитрид галлия GaN электронного типа проводимости в связи с использованием таких систем в омических и полевых контактах Шоттки мощных нитридгаллиевых СВЧ транзисторах.

## 2. Методическая часть

Для изготовления планарных кристаллов диодов Шоттки использовалась выращенная на подложке сапфира эпитаксиальная  $n\text{-n}^+\text{-GaN}(0001)$  структура. Толщина эпитаксиального слоя  $n\text{-GaN}$  концентрацией  $N_D = 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  составляла 180 нм, слоя  $n^+\text{-GaN}$  с концентрацией  $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  — 5 мкм. Со стороны эпитаксиального слоя  $n\text{-GaN}$  методом плазменного травления изготавливались мезы высотой 200 нм. Затем вокруг мез на поверхности высоколегированного слоя  $n^+\text{-GaN}$  методом взрывной литографии формировались омические TiAlNiAu-контакты с последующим быстрым термическим отжигом в атмосфере азота при температуре 780 °С. После этого на поверхности эпитаксиального  $n$ -слоя мез методом взрывной литографии формировался AuNi-контакт Шоттки диаметром  $D_1=5$ ,  $D_2=10$ ,  $D_3=40$ , или  $D_4=120$  мкм. Толщина Ni составляла 50 нм, Au — 200 нм.

Контроль размеров изготовленных контактов (рис. 1, *a* и *b*) и работы выхода электронов  $A_e = e\varphi_{S(m)}$  (1) (рис. 1, *c* и *d*) проводились на атомно-силовом микроскопе (АСМ) “Solver-HV” (производства NT MDT) работающего в двухпроходном режиме метода зонда Кельвина. Влияние элементов конструкции кантилевера на результаты измерений — так называемое приборное влияние, не превышало 2.5 % на расстоянии 5 мкм от контакта и 10 % в непосредственной близости от него.

$$e\varphi_{S(m)} = e\varphi_p - e\Delta\varphi_{S(m)}, \quad (1)$$

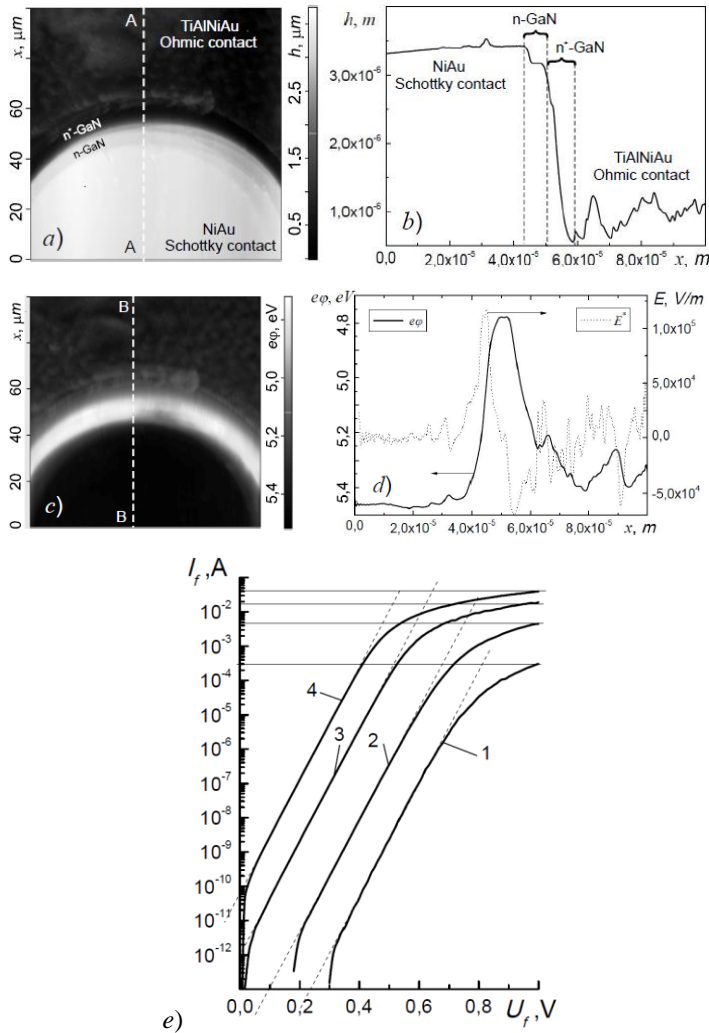


Рис. 1. AFM-изображения участка поверхности AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN кристалла диода Шоттки D=120 мкм с окружающим его TiAlNiAu-омическим контактом к n<sup>+</sup>-GaN: рельефа h(x, y) — a), профиля A — A поперечного сечения рельефа h(x) — b), распределения A<sub>e</sub>=eφ(x, y) — c), профиля B — B поперечного сечения eφ(x, y) — d). Прямые ВАХ диодных AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN кристаллов с диаметрами контактов Шоттки D: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120 мкм — e).

Fig. 1. AFM images of region of the AuNi / n-n<sup>+</sup>-GaN surface of a Schottky diode crystal D=120 μm with ohmic contact of TiAlNiAu on n<sup>+</sup>-GaN: surface h(x, y) — a), cross-cut A—A of surface h(x) — b), distribution of surface potential A<sub>e</sub>=eφ(x, y) — c), cross-cut B—B of surface potential eφ(x, y) — d). Forward IV characteristic of AuNi/n-n<sup>+</sup>-GaN crystals with D: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 and 4 — 120 μm — e)

здесь  $e=1$  — заряд электрона в системе СГС,  $e\varphi_p(W_2C)=4.92$  эВ — работа выхода иглы кантилевера (НА-FM/ $W_2C$ ) с покрытием из карбида вольфрама  $W_2C$ ,  $\varphi_{S(m)}$  — электростатический потенциал (далее — потенциал) исследуемой поверхности полупроводника ( $s$ ), или металлического контакта ( $m$ ),  $\Delta\varphi(x, y)$  — измеряемая АСМ-методом Кельвина контактная разность потенциалов (КРП). Измерения статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных контактов Шоттки проводились на зондовой станции “Cascade-M150” с использованием измерителя электрических характеристик полупроводниковых приборов В1500А производства Keysight Technologies (рис. 1,  $e$ ).

### 3. Результаты эксперимента

Полученные результаты АСМ-измерений указывают на то, что несмотря на многослойную конструкцию омического контакта, его поверхностный потенциал практически не отличается от поверхностного потенциала высоколегированного широкозонного полупроводника  $n^+$ -GaN (рис. 1,  $a$ , ohmic contact), что соответствует энергетической диаграмме соответствующей диффузионной теории токопереноса в омических контактах. В пользу этого свидетельствует и то, что на границе ОК с материалом  $n^+$ -GaN отсутствует всплеск потенциала. Это указывает на отсутствие потенциального барьера на интерфейсе TiAlNiAu/ $n^+$ -GaN. Данный факт находится в противоречии с известным утверждением о том, что перенос подвижных носителей электрических зарядов в TiAlNiAu/ $n^+$ -GaN омических контактах происходит по термоэмиссионному механизму через барьер Шоттки с низкой эффективной высотой барьера  $\varphi_{b,eff}$  [7]. Для окончательного ответа на вопрос о механизмах токопрохождения в TiAlNiAu/ $n^+$ -GaN омических контактах, по всей вероятности, необходимо проведение более подробных исследований.

В отличие от поверхностного потенциала ОК поведение поверхностного потенциала плоских AuNi/ $n$ -GaN контактов Шоттки заметно отличается от электростатического потенциала окружающей его полупроводниковой поверхности  $n$ -GaN. Распределение потенциала исследуемых контактов Шоттки аналогично поведению потенциала плоских Me/ $n$ -GaAs контактов Шоттки на арсениде галлия. В частности, из рис. 1,  $a$  следует, что работа выхода электронов из металлического контакта на  $n$ -GaN также, как и в случае с контактами Шоттки на арсениде галлия значительно превышает работу выхода электронов  $A_e$  со свободной полупроводниковой поверхности  $n$ -GaN. При этом работа выхода с поверхности металлических контактов на  $n$ -GaN так же, как и в случае с плоскими контактами Me/ $n$ -GaAs, имеет зависимость от диаметра  $D$ . Так, для контактов с диа-

метрами  $D \gg 120$  мкм значение работы выхода приближается к значению работы выхода сплошной золотой пленки  $e\varphi_{Au} = e\varphi_{Au}(film) = 5.40$  эВ (рис. 2, *b*). Согласно полученным результатам уменьшение диаметра контактов приводит к уменьшению работы выхода, которая для  $D = 5$  мкм составляет уже  $e\varphi_{(m)}(Au) = 5.14$  эВ (рис. 2, *b*). За периферией контакта наблюдается переходная область плавно изменяющегося потенциала — “ореол” протяженностью  $l^*$ , характерный и для плоских контактов Шоттки на арсениде галлия, а также переходная область внутри периферии — “ореол” протяженностью  $l_C^*$  (рис. 2, *b*).

Согласно [1—3, 8, 10, 11] результирующий вектор встроенного электростатического поля периферии  $E_l$  контактов М — П с БШ является суперпозицией вектора постоянного электростатического поля  $E_{grad}$ , образованного разностью поверхностных потенциалов металлического контакта и свободной полупроводниковой поверхностью, и зависящего от формы (площади  $S$  и периметра  $P$ ) контакта и направленного противоположно нескомпенсированного вектора электростатического поля  $E^*$ :

$$E_l = E_{grad} + E^*, \text{ а для модулей } |E_l| = |E_{grad}| - |E^*|. \quad (2)$$

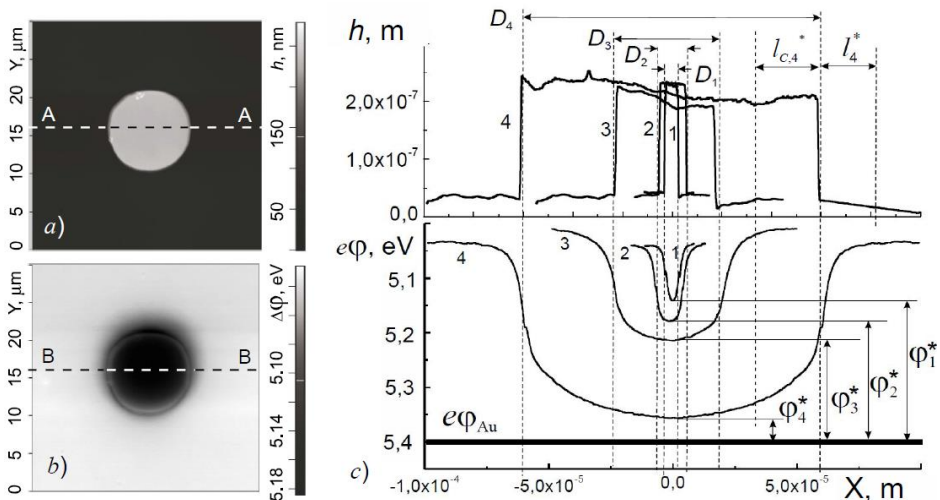


Рис. 2. АСМ-изображение рельефа  $h(x,y)$  — *a*),  $A_e = e\varphi(x,y)$  одиночного плоского AuNi/n-GaN контакта Шоттки диаметром  $D = 10$  мкм — *b*). Профили поперечных сечений рельефов  $h(x,y)$  (A — A) и  $A_e = e\varphi(x,y)$  (B — B) AuNi/n-GaN контактов Шоттки диаметрами  $D$ : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120 мкм — *c*).

Fig. 2. AFM image of surface  $h(x,y)$  — *a*),  $A_e = e\varphi(x,y)$  of flat AuNi/n-GaN Schottky diodes with  $D = 10$   $\mu\text{m}$  — *b*). Cross-cuts of surface  $h(x,y)$  (A—A) and  $A_e = e\varphi(x,y)$  (B—B) AuNi/n-GaN AuNi/n-GaN Schottky diodes with  $D$ : 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40 и 4 — 120  $\mu\text{m}$  — *c*)

Согласно [8, 10, 11] встроенное электрическое поле  $E_l$  формирует в области контакта встроенный электростатический потенциал  $\varphi^*$ , который, как было показано выше, может оказывать значительное влияние на работу выхода электронов из металлических контактов Шоттки.

Хорошо видно, что максимум электрического поля  $E^*$  приходится именно на периферию выпрямляющего AuNi-контакта. Как видно из рис. 2,  $b$  величина  $e\varphi^*(E_l)$  (2) легко измеряется и в данном случае в зависимости от диаметра контакта принимает следующие значения:  $e\varphi_1^*(D=5 \text{ мкм})=0.26 \text{ эВ}$ ,  $e\varphi_2^*(D=10 \text{ мкм})=0.22 \text{ эВ}$ ,  $e\varphi_3^*(D=40 \text{ мкм})=0.19 \text{ эВ}$  и  $e\varphi_4^*(D=120 \text{ мкм})=0.06 \text{ эВ}$ . Составляющая  $E^*$  электрического поля  $E_l$  согласно [8] может быть легко измерена в АСМ-методе Кельвина (рис. 1,  $d$ ).

Изготовленные NiAu/n-GaN контакты Шоттки имеют классические ВАХ с достаточно хорошими значениями показателя идеальности  $n=1.06—1.1$  и высотой барьера  $e\varphi_b=0.93—0.98 \text{ эВ}$  (рис. 1,  $e$ ). Это позволяет интерпретировать полученные результаты с использованием известных физических представлений о выпрямляющих контактах металл — полупроводник с барьером Шоттки.

#### 4. Обсуждение результатов

Из [1—3, 8, 10, 11] следует, что форма плоских контактов Шоттки играет важную роль в определении их основных приборных характеристик: токов насыщения  $I_S$ , емкостей  $C$ , высот потенциальных барьеров  $\varphi_b$ , последовательных сопротивлений  $R_S$  и др. Напомним, что плоский контакт Шоттки бесконечной площади  $S \rightarrow \infty$  не имеет выпрямляющих характеристик. Значение его  $R_S$  стремится к нулю, а значения его  $I_S$  и  $C$  бесконечны. По этой причине методы вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик не могут быть использованы для нахождения значений их барьеров Шоттки  $\varphi_b$ . Приборные характеристики плоских контактов М — П появляются только после появления у них периметра  $P$  и обретения конкретной площади  $S$ . Столь значительное влияние периметра на приборные характеристики плоских контактов М — П с БШ заслуживает более подробного рассмотрения.

На возможность влияния периферии плоских контактов М — П с БШ на их электростатическую систему впервые было обращено внимание в монографии Мамедова [9]. В частности, там указывалось на то, что вокруг периметра металлических контактов Шоттки существует дополнительное электрическое поле  $E_d$ , образованное разностью поверхностных потенциалов металлического контакта  $\varphi_m$  и свободной полупроводниковой

поверхности  $\varphi_s$ . Согласно [9], вектор напряженности  $E_d$  в окружающей контакт области для заданной системы М — П направлен противоположно вектору напряженности электрического поля ОПЗ  $E_w$ , а максимальное значение модуля  $|E_d| = \text{Const}$  постоянно и никак не связано с формой контактов — ни с их площадью  $S$ , ни с их периметром  $P$ .

Как следует из [1, 2, 10, 11], наличие  $E_d$  по периметру недостаточно для объяснения зависимости поверхностного потенциала плоского контакта Шоттки от его линейных размеров, а также токовой и вольтовой фоточувствительностей [8]. Выше указывалось, что вокруг периметра контактов М — П с БШ, кроме постоянного  $|E_{\text{grad}}| = |E_w| = \text{Const}$ , существует еще выходящее в полупроводник через боковую поверхность его области пространственного заряда (ОПЗ) и зависящее от площади и периметра контакта нескомпенсированное электрическое поле  $E^*$  (рис. 2, *c, d* и рис. 3). В данном случае вектор  $E_{\text{grad}}$  равен по модулю  $E_d$ , но сонаправлен с вектором электрического поля ОПЗ  $E_w$  (рис. 3, *a, SCh*). В общем случае, для заданной системы М — П максимальное значение  $|E_{\text{grad}}| = |E_w|$ , а среднее значение  $\langle |E_{\text{grad}}| \rangle$ :

$$\langle |E_{\text{grad}}(\mathbf{r})| \rangle = \frac{\varphi_{\text{Au, film}} - \varphi_s(x)}{\Delta r}. \quad (3)$$

Вектор  $E^*$ , согласно теореме Остроградского — Гаусса, определяется плотностью потока вектора смещения электростатического поля через боковую поверхность ОПЗ [11]. Вне контакта вектор  $E^*$  направлен от контакта по нормали к боковой поверхности ОПЗ в сторону убывания потенциала, а в области контакта — по нормали к плоскости контакта противоположно векторам  $E_w$  и  $E_{\text{grad}}$ . Площадь боковой поверхности ОПЗ можно рассчитать как  $S^* = W_{\text{SCh}} \times P$ , где  $W_{\text{SCh}}$  — ширина ОПЗ при нулевом смещении на БШ.

Для плоских контактов Шоттки малых площадей ( $D < 500$  мкм) при постоянном периметре  $P = \text{Const}$  уменьшение площади  $S \rightarrow 0$  будет сопровождаться уменьшением электрического заряда  $Q_w$  в ОПЗ, что, согласно теореме Остроградского — Гаусса, при неизменной площади боковой поверхности  $S^*$  приведет к уменьшению плотности потока вектора смещения электрического поля через боковую поверхность ОПЗ и, соответственно, к уменьшению модуля  $|E^*|$ , увеличению, согласно (2),  $|E_l|$  и увеличению встроенного в контакт электростатического потенциала  $\varphi^*$ . Согласно рис. 2, *c* это приведет к уменьшению работы выхода электронов  $A_e$  с Au-поверхности AuNi-контактов Шоттки.

И наоборот, при постоянной площади контакта  $S = \text{Const}$  и уменьшающемся периметре  $P \rightarrow 0$  заряд  $Q_w$  остается постоянным, а площадь боко-



вой поверхности ОПЗ будет уменьшаться. В этом случае плотность потока вектора смещения электрического поля через боковую поверхность ОПЗ будет увеличиваться, что приведет к увеличению модуля  $|E^*|$ , уменьшению  $|E_l|$  и, согласно (2), уменьшению встроенного потенциала  $\varphi^*$  [10]. Согласно рис. 2,с это приведет к увеличению работы выхода электронов  $A_e$  с Au-поверхности AuNi-контактов Шоттки.

Для плоских контактов больших площадей  $S \rightarrow \infty$  модуль  $|E^*| \approx |E_{grad}|$  — электростатическое поле  $|E^*|$  максимально, а, согласно (2),  $|E_l| \rightarrow 0$  минимально и  $\varphi^*$  имеет минимальное значение. Поэтому, как показывают эксперименты, для AuNi/n-GaN контактов Шоттки с линейными размерами больше  $D \geq 500$  мкм поверхностный потенциал плоских металлических контактов (работа выхода  $A_e$ ) практически не зависит от их размеров и формы и приближается к работе выхода сплошной металлической пленки.

Максимальное значение модуля  $|E_w| \approx 5 \times 10^5$  В/м для заданной системы AuNi/n-GaN контакта Шоттки было найдено из решения уравнения Пуассона с учетом сил зеркального изображения при  $\varphi_b = 0.93$  эВ. Таким образом, зная  $|E_{grad}| = |E_w|$  и, измерив  $E^*$ , из соотношения (2) можно легко определить и результирующее встроенное электростатическое поле периферии  $E_l$ .

## 5. Заключение

Предложенная физическая модель плоского контакта металл — полупроводник с барьером Шоттки основана на определяющей роли периметра  $P$ , в формировании его основных приборных характеристик. Столь сильное влияние периметра осуществляется за счет встроенного электростатического поля периферии  $E_l$  возникающего в результате суперпозиции выходящего за боковую поверхность ОПЗ и зависящего от линейных размеров контакта нескомпенсированного электрического поля  $E^*$  и электрического поля, образованного градиентом между поверхностными потенциалами контакта и свободной полупроводниковой поверхностью  $E_{grad}$ . Предложенная физическая модель пригодна для описания электростатических полей AuNi-контактов Шоттки на широкозонных материалах, например n-GaN, и может использоваться в качестве дополнения к физическим моделям плоских выпрямляющих контактов металл — полупроводник Шоттки — Мотта [14], или Бардина [15]. Из вышеизложенного следует, что наибольшее влияние встроенные электростатические поля периферии будут оказывать на электростатическую систему выпрямляющих контактов М — П микронных и наноразмеров.

Результаты АСМ-исследований электростатической системы TiAl-NiAu/n<sup>+</sup>-GaN омических контактов указывают на преобладающую в них

роль диффузионного механизма переноса подвижных носителей электрических зарядов.

### Список литературы

1. Torkhov N. A., Novikov V. A. The Effect of the Periphery of Metal-Semiconductor Schottky-Barrier Contacts on their Electrical Characteristics // *Semiconductors*. 2011. Т. 45, № 1. С. 69—84.
2. Torkhov N. A. Effect of the Periphery of Metal-Semiconductor Contacts with Schottky Barriers on their Static Current-Voltage Characteristic // *Semiconductors*. 2010. Т. 44, № 5. С. 1—12.
3. Торхов Н. А., Божков В. Г., Ивонин И. В., Новиков В. А.. Исследование распределения потенциала на локально металлизированной поверхности n-GaAs методом атомно-силовой микроскопии // *Поверхность*. 2009. Т. 11. С. 1—10.
4. Торхов Н. А., Божков В. Г., Гушин С. М., Новиков В. А. Оптимизация умножительного диода Шоттки миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012. С. 635—636.
5. Торхов Н. А., Новиков В. А., Мармалюк А. А., Рябоштан Ю. Л. Влияние морфологии поверхности на приборные характеристики планарных InP/GaAs диодов Шоттки миллиметрового диапазона // 22-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, 2012. С. 633—634.
6. Торхов Н. А., Божков В. Г., Новиков В. А., Ивонин И. В. Исследование электрических полей Ni/GaN контактов металл — полупроводник с барьером Шоттки методами атомно-силовой микроскопии. 25-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии // Севастополь, 2015. С. 611—612.
7. Cornelia M., Carolus J., Krämer M. Gallium nitride-based microwave high-power heterostructure field-effect transistors : design, technology, and characterization // Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven. 2006. Proefschrift.
8. Торхов Н. А. Влияние электростатического поля периферии на вентильный фотоэффект в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки // *ФТП*. 2018. Т. 52, № 10. С. 1150.
9. Мамедов Р. К. Контакты металл — полупроводник с электрическим полем пятен. Баку : БГУ, 2003.
10. Торхов Н. А. Влияние фото-ЭДС на токопрохождение в контактах металл — полупроводник с барьером Шоттки // *ФТП*. 2011. Т. 45, № 7. С. 965—973.
11. Торхов Н. А. Поверхностный потенциал контактов металл — полупроводник с барьером Шоттки // *Известия ВУЗов. Физика*. 2008. Депонировано в ВИНТИ № 334-V2008 от 18.04.2008.
12. 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. Т. 119. С. 094505.
13. Миронов Л. В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород, Институт физики микроструктур РАН. 2004.
14. Meyerhof W. E. Contact potential difference in silicon crystal rectifiers // *Phys. Rev.* 1947. Т. 71, № 10. С. 727.
15. Rhoderick E. H., Williams R. H. Metall-semiconductor contacts // 2<sup>nd</sup> ed. Clarendon. Oxford, 1988.

### Информация об авторах

**Торхов Николай Анатольевич**, ведущий инженер-технолог ЦК ТКИС АО «НИИПП» Россия, 634034, г. Томск, ул. Красноармейская 99 А. ORCID 0000-0003-0466-881X.

**Новиков Вадим Александрович**, доцент, Физический факультет Томского государственного университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 36. ORCID 0000-0002-2195-4060.

### Information about the authors

**Nikolay A. Torkhov**, Leading Process Engineer of the Scientific-Research Institute of Semiconductor Devices, Russian Federation, 634034, Tomsk, Krasnoarmeiskaya Str. 99A. ORCID 0000-0003-0466-881X.

**Vadim A. Novikov**, assistant professor of Tomsk State University, Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenina Av. 36. ORCID 0000-0002-2195-4060.