

# Зависимость механизма протекания тока в сплавном омическом контакте In–n–GaN от концентрации основных носителей заряда

© В.Н. Бессолов, Т.В. Бланк<sup>¶</sup>, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, Е.А. Поссе

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 6 марта 2008 г. Принята к печати 11 марта 2008 г.)

На основании исследования температурной зависимости сопротивления сплавных омических контактов In–n–GaN обнаружено, что механизм протекания тока в них существенно зависит от концентрации  $N$  нескомпенсированных доноров в GaN: при  $N = 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  основным является протекание тока по металлическим шунтам, а при  $N \geq 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  — туннелирование.

PACS: 73.40.Cg, 73.40.Ns

## 1. Введение

К настоящему времени разработаны три основные модели механизма протекания тока в омическом контакте металл–полупроводник: термоэлектронная эмиссия, туннелирование, ток по металлическим шунтам [1–3]. Термоэлектронная эмиссия и туннелирование характерны для диодов Шоттки и несплавных омических контактов. При высоких температурах  $T$  и низких концентрациях нескомпенсированных примесей в полупроводнике  $N$  (при условии  $kT \gg (q\hbar/2)\sqrt{N/\varepsilon_s m^*}$ ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $q$  — заряд электрона,  $\hbar$  — постоянная Планка,  $\varepsilon_s$  — диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $m^*$  — эффективная масса основных носителей заряда в полупроводнике) применима теория термоэлектронной эмиссии. Согласно теории, сопротивление контакта, приведенное к единице площади,  $R_c$ , экспоненциально уменьшается с ростом температуры  $T$  и уменьшением высоты потенциального барьера металл–полупроводник  $\phi_B$ :  $R_c \propto \exp(q\phi_B/kT)$ . При низких температурах и высоких концентрациях нескомпенсированных примесей в полупроводнике,  $kT \ll (q\hbar/2)\sqrt{N/\varepsilon_s m^*}$ , справедливы представления теории полевой эмиссии (туннелирование), согласно которым сопротивление контакта  $R_c$  не зависит от  $T$ , но возрастает с ростом высоты барьера  $\phi_B$  и уменьшается с ростом концентрации нескомпенсированных примесей в полупроводнике  $N$ :

$$R_c \propto \exp\left(\frac{2\phi_B}{q\hbar}\right) \sqrt{\varepsilon_s m^*/N}.$$

Ток по металлическим шунтам характерен только для сплавных омических контактов. Этот механизм проявляется при наличии большого количества несовершенств в исходных кристаллах, и, согласно этой модели, приведенное сопротивление контакта возрастает с ростом температуры.

Механизм протекания тока в омических контактах к GaN изучался в ряде работ при различных концентрациях нескомпенсированных примесей. В работе [4] пред-

полагалось, что основным механизмом в несплавном омическом контакте Pt–GaN является термоэлектронная эмиссия при  $N = (1.8-10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . В работах [5–7] для омического контакта к GaN на основе Ti и Pt механизм протекания тока определен как туннелирование при  $N \gtrsim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

В работе [8] высказано предположение о существенной роли металлических шунтов при формировании сплавных омических контактов к In–GaP, а в работе [9] ток по металлическим шунтам был определен как основной механизм для сплавного омического контакта In–GaN при  $N \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

При различных температурах, концентрациях нескомпенсированных примесей, различной плотности несовершенств в одном и том же материале могут проявляться различные механизмы протекания тока.

В настоящей работе изучался механизм протекания тока в сплавных омических контактах In–n–GaN в широком интервале температур и концентраций носителей заряда.

## 2. Методика эксперимента

Исходным материалом был монокристаллический GaN, выращенный методом вакуумного осаждения из металлорганических соединений (MOCVD) на подложках из сапфира толщиной 0.4 мм. Слои GaN имели толщину 4 мкм и ориентацию направления роста оси [0001]. Концентрация нескомпенсированных доноров в различных слоях GaN изменялась в пределах от  $5 \cdot 10^{16}$  до  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Подвижность электронов при 300 К изменялась от  $\sim 500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  ( $N = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) до  $\sim 50 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  ( $N = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), плотность дислокаций в кристаллах GaN составляла  $P_d = 10^8 - 10^9 \text{ см}^{-2}$ .

В пластины GaN впалялся ряд In-контактов при 600°C, площадь контактов составляла  $S \sim 10^{-4} \text{ см}^2$ , а общая длина пластины была  $L = 2 \text{ см}$ .

Изображение поверхности слоя GaN после взаимодействия с чистым In-контактом, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM),

<sup>¶</sup> E-mail: tblank@mail.ioffe.ru

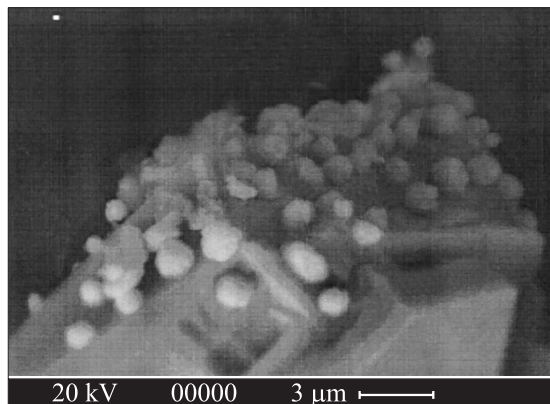


Рис. 1. SEM-изображение поверхности GaN после плавления индия.

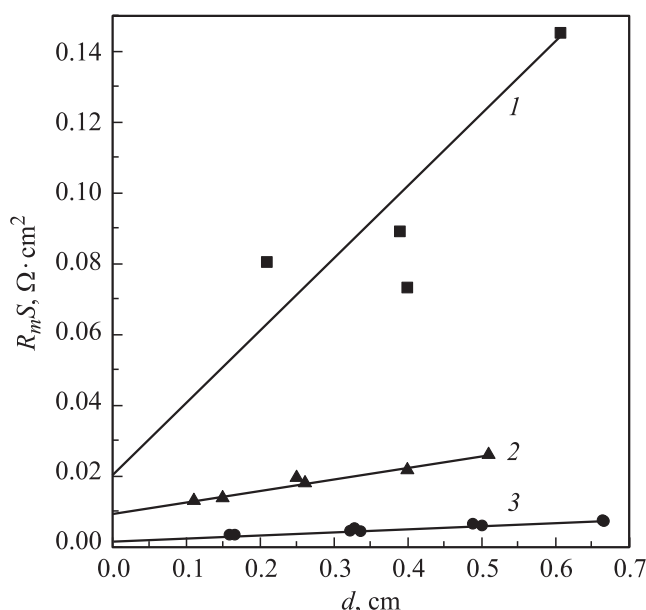


Рис. 2. Зависимость сопротивления структур In-GaN-In с двумя омическими контактами от расстояния между контактами  $d$  для структур с концентрациями нескомпенсированных доноров  $N = 5 \cdot 10^{16}$  (1),  $1 \cdot 10^{18}$  (2),  $8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (3).  $T = 300 \text{ К}$ .

показало, что индий вплавляется в GaN не по всей поверхности, а отдельными каплями размером порядка микрометра (рис. 1).

После плавления и охлаждения до комнатной температуры измерялись вольт-амперные характеристики в интервале температур  $T = 77\text{--}420 \text{ К}$  между первым и всеми остальными контактами. Эти характеристики были линейными. Приведенное сопротивление омических контактов  $R_c$  определялось по методике, описанной в работе [8], как половина величины отсечки по оси ординат линейной зависимости измеряемого сопротивления структуры  $R_m$ , умноженного на площадь контакта  $S$ , от расстояния между контактами  $d$  (рис. 2). При этом

наклон прямой характеризует сопротивление толщи полупроводника.

### 3. Механизм протекания тока в сплавном омическом контакте In-GaN

При низких температурах (77–180 К) сопротивление  $R_c$  уменьшается с ростом температуры. При этом также уменьшается удельное сопротивление толщи GaN.

Наибольший интерес представляет интервал 180–350 К (рис. 3). В этом интервале температурная зависимость приведенного сопротивления омического контакта  $R_c$  существенно различается для структур с различной концентрацией нескомпенсированных доноров в полупроводнике  $N$ :

1) при  $N = 5 \cdot 10^{16}\text{--}1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  сопротивление возрастает с ростом температуры (рис. 3, а);

2) при  $N > 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  сопротивление практически не изменяется с ростом температуры (рис. 3, б).

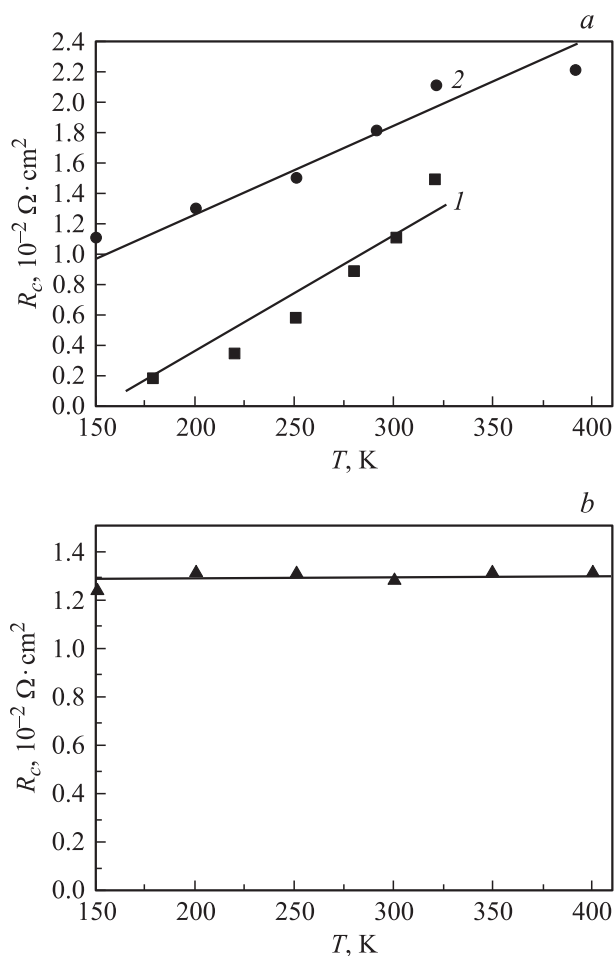


Рис. 3. Зависимость приведенного к единице площади сопротивления омического контакта In-n-GaN от температур при разных концентрациях нескомпенсированных доноров в исходном GaN: а —  $N = 5 \cdot 10^{16}$  (1) и  $1 \cdot 10^{18}$  (2); б —  $N = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Для структур с  $N \leq 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  возрастание приведенного сопротивления омического контакта с ростом температуры свидетельствует о протекании тока по металлическим шунтам, представляющим собой атомы индия, осажденные на несовершенствах (например, по линиям дислокаций, проходящим сквозь слой объемного заряда). Оценка количества шунтов на единицу площади контакта, выполненная аналогично [8], показала, что при концентрациях нескомпенсированных доноров  $N$  от  $5 \cdot 10^{16}$  до  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  количество шунтов составляет  $(2-7) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Эта величина в несколько раз меньше величины плотности дислокаций в исследуемых слоях GaN ( $10^8-10^9 \text{ см}^{-2}$ ). Различие можно объяснить тем, что площадь контакта In–GaN существенно меньше площади поверхности кристалла GaN под слоем металла (рис. 1).

Тот факт, что при  $N \gtrsim 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  сопротивление омического контакта, приведенное к единице площади, практически не изменялось с температурой, свидетельствует о туннельном механизме протекания тока. При высоких концентрациях сопротивление, связанное с туннельным прохождением электронами границы металл–полупроводник, становится заметно меньшим, чем сопротивление металлических шунтов, количество которых не должно существенно зависеть от концентрации электронов, а должно зависеть только от плотности несовершенств в кристаллах. Граница перехода от одного механизма протекания тока к другому лежит в интервале концентраций  $(1-8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Это согласуется с результатами работы [4], в которой был установлен туннельный механизм для несплавных контактов при  $N > 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , и с результатами работы [9], в которой металлические шунты были основным механизмом протекания тока в сплавных контактах при  $N \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

#### 4. Заключение

На основании исследования температурной зависимости сопротивления сплавных омических контактов In–n-GaN обнаружено, что механизм протекания тока в них существенно зависит от концентрации нескомпенсированных доноров  $N$  в GaN. При  $N = 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  основным механизмом является протекание тока по металлическим шунтам (чего не наблюдается в несплавных контактах). При  $N \geq 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  основным механизмом протекания тока становится туннелирование, как и в случае несплавных контактов.

#### Список литературы

- [1] E.H. Rhoderick. *Metal–Semiconductor Contacts* (Oxford, 1978).
- [2] A.Y.C. Yu. Sol. St. Electron., **13**, 239 (1970).
- [3] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. ФТП, **41** (11), 1281 (2007).
- [4] J.-S. Jang, T.-Y. Seong. Appl. Phys. Lett., **76** (19), 2743 (2000).

- [5] J.D. Guo, C.I. Lin, M.S. Feng, F.M. Pan, G.C. Chi, T.C. Lee. Appl. Phys. Lett., **68** (2), 235 (1996).
- [6] Z. Fan, S.N. Mohammad, W. Kim, Ö. Aktas, A.E. Botchkarev, H. Morkoç. Appl. Phys. Lett., **68** (12), 1672 (1996).
- [7] C. Lu, H. Chen, X. Lv, X. Xie, S.N. Mohammad. J. Appl. Phys., **91** (11), 9218 (2002).
- [8] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.Г. Никитин, Е.А. Поссе. Письма ЖТФ, **30** (19), 17 (2004).
- [9] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.Г. Никитин, Е.А. Поссе. ФТП, **40** (10), 1204 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

#### Dependence of the current mechanism in the alloyed In–n-GaN contact on the major charge carrier concentration

V.N. Bessolov, T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, O.V. Konstantinov, E.A. Posse

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The resistance of the alloyed In–n-GaN ohmic contact has been studied. The current mechanism essentially depends on the concentration of uncompensated donors in GaN. In the case of the donor concentration  $N = 5 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  the main mechanism is the current through metallic shunts, and when  $N > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  the main mechanism is tunnelling.