

Механизм протекания тока в омическом контакте Pd–сильно легированный $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

© Т.В. Бланк[¶], Ю.А. Гольдберг^{¶¶}, Е.В. Калинина^{¶¶¶}, О.В. Константинов,
А.Е. Николаев, А.В. Фомин,* А.Е. Черенков*

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

*Центр по исследованию роста кристаллов,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 сентября 2000 г. Принята к печати 19 сентября 2000 г.)

Изучается механизм протекания тока в омическом контакте металл–(сильно легированный $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$). Твердый раствор $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ с концентрацией нескомпенсированных акцепторов $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ выращивался методом хлорид-гидридной эпитаксии. Омический Pd-контакт создавался методом термовакуумного напыления с последующими температурными обработками. Показано, что барьерный контакт Pd– $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ с высотой потенциального барьера $\sim 2.3 \text{ В}$ после термообработки переходил в омический. Высота потенциального барьера при этом уменьшалась до $\sim 0.05 \text{ В}$.

Установлено, что основным механизмом протекания тока в омическом контакте Pd– $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ при $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ является термоэлектронная эмиссия. С увеличением концентрации нескомпенсированных акцепторов в твердом растворе до $N_a - N_d \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдался переход от термоэлектронной эмиссии (при высоких температурах) к туннелированию (при низких температурах).

Введение

В последние годы большое внимание уделяется исследованию широкозонных полупроводников, таких как GaN и твердые растворы $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, в связи с развитием технологии изготовления источников света и фотоприемников для ультрафиолетовой и видимой области спектра, полевых транзисторов и других приборов [1–3]. Эти приборы включают в себя контакт металл–полупроводник либо в качестве активного элемента, либо в качестве омического контакта. Однако изготовление омического контакта к нитридам p -типа проводимости представляет существенные трудности из-за сложности легирования их до концентрации $\gtrsim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [4]. Кроме того, уровень Ферми на поверхности GaN и твердых растворов на его основе, в отличие от других полупроводников $\text{Al}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, не закреплен, поэтому высота потенциального барьера существенно зависит от работы выхода электрона из металла. Металлы с работой выхода выше, чем сумма сродства к электрону и ширины запрещенной зоны GaN или AlN (более 7 эВ), отсутствуют [5], поэтому исключается возможность создания "идеального" омического контакта.

Существуют два основных механизма протекания тока в омическом контакте — термоэлектронная эмиссия и туннелирование [6].

Согласно термоэлектронной эмиссии, прямой ток I_f экспоненциально зависит от напряжения V и температуры T :

$$I_f = I_s \exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right), \quad (1)$$

$$I_s = A^* S T^2 \exp\left(\frac{-q\varphi_B}{kT}\right), \quad (2)$$

где I_s — ток насыщения, q — заряд электрона, n — коэффициент идеальности, k — постоянная Больцмана, φ_B — высота потенциального барьера, A^* — эффективная постоянная Ричардсона,

$$A^* = A \frac{m^*}{m_0} \quad (3)$$

($A = 120 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ — постоянная Ричардсона, m^*/m_0 — эффективная масса основных носителей заряда). Сопротивление контакта $R \equiv dV/dI$ при $V \rightarrow 0$ составляет

$$R = \left(\frac{k}{qA^*TS}\right) \exp\left(\frac{q\varphi_B}{kT}\right), \quad (4)$$

а приведенное к единице площади (S) сопротивление контакта — $R_c = RS$. Зависимость RT от $1/T$ в полулогарифмическом масштабе должна быть линейной, а наклон этой линии характеризует высоту барьера φ_B .

Согласно туннельной теории [6], сопротивление контакта, приведенное к единице площади, описывается выражением

$$\frac{1}{R_c} = \frac{m^* q^2}{2\pi \hbar^3} \int_0^\infty \left(\frac{T(E)}{\exp[(E - \mu)/kT] - 1}\right) dE, \quad (5)$$

где \hbar — постоянная Планка; $T(E)$ — вероятность прохождения носителя, имеющего энергию E , через барьер, меньший $q\varphi_B$ на величину ΔE ; μ — энергия уровня Ферми (E_F) в полупроводнике.

В работе [7] было показано, что

$$R_c \propto \exp\left[\left(\frac{2\sqrt{\varepsilon_s \varepsilon_0 m^*}}{\hbar}\right) \left(\frac{\varphi_B}{N^{1/2}}\right)\right], \quad (6)$$

где ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, ε_s — диэлектрическая проницаемость полупроводни-

[¶] E-mail: tblank@delfa.net

^{¶¶} E-mail: mlebl@triat.ioffe.rssi.ru

^{¶¶¶} E-mail: evk@pop.ioffe.rssi.ru

ка, N — концентрация нескомпенсированных примесей. В этом случае сопротивление контакта R должно экспоненциально зависеть от $N^{-1/2}$ и практически не должно зависеть от температуры.

В литературе представлено немного данных по механизму протекания тока в омическом контакте для структур на основе полупроводниковых нитридов, особенно p -типа проводимости.

Так, в работе [8] для случая омического контакта Ti/Ag к сильно легированному n -GaN (концентрации нескомпенсированных доноров $N_d - N_a = 1.5 \cdot 10^{17} - 1.7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) был установлен туннельный механизм протекания тока и определена высота потенциального барьера (0.067 эВ).

В работе [5] изучался несплавной контакт Pt- p -GaN при концентрациях нескомпенсированных акцепторов в GaN $N_a - N_d = 1.8 \cdot 10^{17}$ и $1.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Было показано, что для контакта Pt- p -GaN в первом случае ($N_a - N_d = 1.8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) после обычной обработки поверхности преобладающим механизмом прохождения тока через контакт была термоэлектронная эмиссия. Однако после окисления и обработки поверхности в $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ (для случая $N_a - N_d = 1.0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) основным механизмом протекания тока являлось туннелирование. При этом для несплавного контакта, несмотря на линейную вольт-амперную характеристику, высота барьера составила 0.42 эВ.

В настоящей работе изучались свойства омического контакта Pd- p - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ при высоких концентрациях дырок в полупроводнике.

Эксперимент

Pd-контакты формировались на эпитаксиальных слоях p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$, выращенных методом хлорид-гидридной газовой эпитаксии (HVPE) на коммерческих подложках 6H-SiC n -типа проводимости. Концентрация нескомпенсированных акцепторов в эпитаксиальных слоях p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ составляла $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при толщине слоя твердого раствора $\sim 0.7 \text{ мкм}$. Pd наносился на эпитаксиальные слои методом термовакуумного напыления после обработки поверхности в растворе KOH. Затем контакты отжигались при температуре 800°C в течение 20 с в атмосфере N_2 .

Концентрация $N_a - N_d$ в эпитаксиальных слоях определялась с помощью ртутного зонда и из характеристик емкость-напряжение (C - V) барьеров Шоттки, которые создавались термовакуумным напылением Al или Au на слои p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$. Измерения проводились на частоте 10 кГц при 300 К.

Сопротивление контактов измерялось по методике [9] в интервале температур 90–400 К.

На части кристаллов, помимо омических контактов, создавался барьерный контакт напылением Pd и измерялась высота потенциального барьера Pd- p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ из характеристик ток-напряжение (I - V) и емкость-напряжение (C - V).

Результаты и обсуждение

Как известно, высота барьера Шоттки в структурах Pd- p -GaN и Pd- p - $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ определяется работой выхода электрона из металла, сродством к электрону и шириной запрещенной зоны полупроводника. Работа выхода электрона из Pd составляет $\Phi_m = 5.12 - 5.17 \text{ эВ}$ [6]. Ширина запрещенной зоны E_g для GaN составляет 3.39 эВ, а для AlN — 6.2 эВ; сродство к электрону составляет $\chi_s = 4.1 \text{ эВ}$ для GaN и $\chi_s = 0.6 \text{ эВ}$ для AlN [10]. Если допустить, что для составов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, близких к GaN, ширина запрещенной зоны E_g и сродство к электрону χ_s изменяются линейно в зависимости от величины x , то для $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ $E_g = 3.56 \text{ эВ}$ и $\chi_s = 3.9 \text{ эВ}$. Следовательно, высота барьера Pd- p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ должна быть $E_g - \Phi_m + \chi_s = 2.3 \text{ эВ}$.

Экспериментально определенные из C - V -характеристик значения высоты барьера Pd- p - $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ оказались равными 2.35 эВ, что близко к теоретически ожидаемому значению (рис. 1).

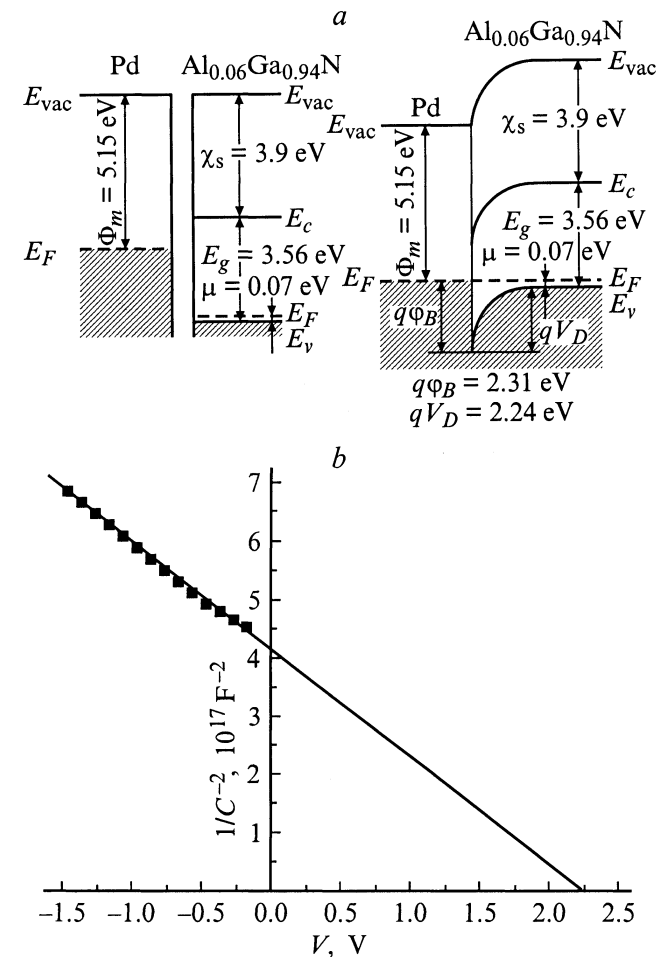


Рис. 1. *a* — энергетическая диаграмма барьерного контакта Pd- $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$; *b* — экспериментальная зависимость емкости от напряжения для этого контакта при $T = 300 \text{ К}$ (*b*). E_{vac} — уровень вакуума, E_c — энергия дна зоны проводимости, E_v — энергия потолка валентной зоны, E_F — уровень Ферми.

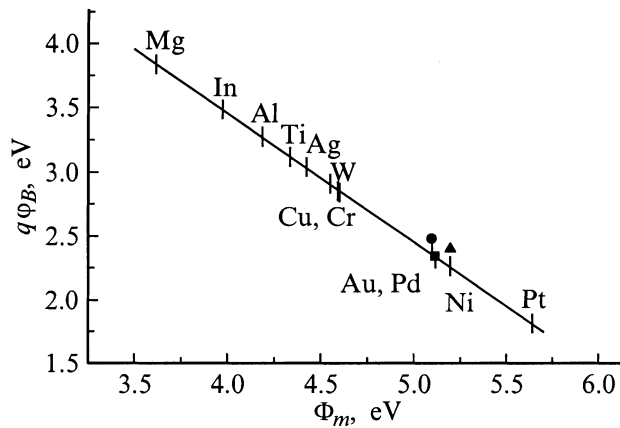


Рис. 2. Зависимость высоты потенциального барьера $q\varphi_B$ для $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ от работы выхода металла Φ_m . Риски — расчетные значения $q\varphi_B = E_g - \Phi_m + \chi_s$; точки — экспериментальные значения для Au-p-GaN [11], Ni-p-GaN [12], $\text{Pd-p-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ (данная работа).

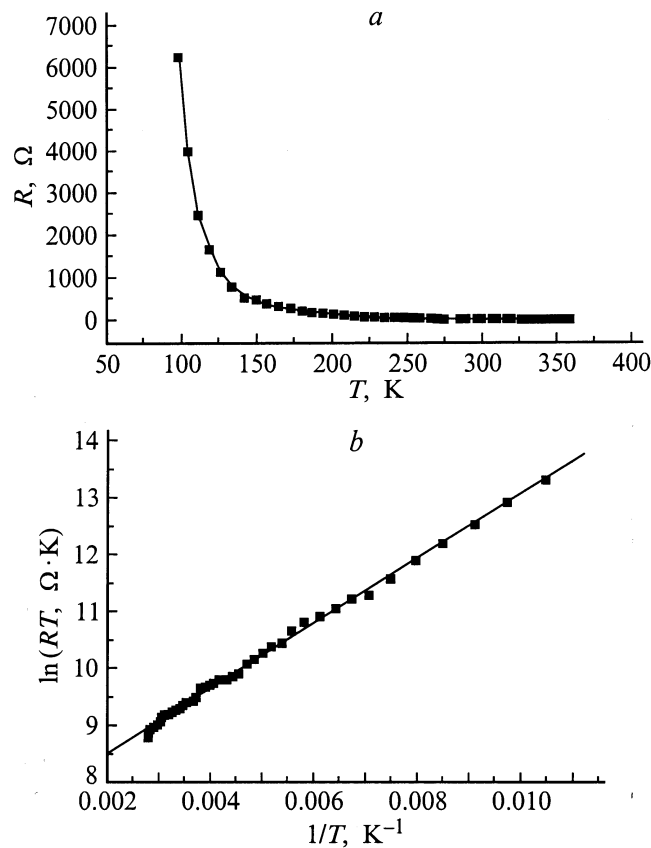


Рис. 3. Зависимость сопротивления R омического контакта $\text{Pd-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ ($N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) от температуры T (a) и зависимости RT от $1/T$ (b).

Отметим, что в работе [11] для близких по параметрам структур Au-p-GaN ($N_a - N_d = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $E_g = 3.39 \text{ эВ}$, $\Phi_m = 5.1 \text{ эВ}$, $\chi_s = 4.1 \text{ эВ}$) также наблюдалось соответствие теоретического (2.4 В) и эксперимен-

тального значений φ_B (2.48 В), а в работе [12] определенная из $I-V$ - и $C-V$ -характеристик высота барьера структур Ni-p-GaN ($4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) составила 2.4 В (рис. 2).

Результаты изучения сопротивления омических контактов $\text{Pd-p-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ сводятся к следующему.

1) В случае контактов к твердому раствору с концентрацией $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ сопротивление контакта уменьшалось с ростом температуры. Зависимость RT от $1/T$ во всем исследованном интервале температур 90–360 К оказалась линейной в полулогарифмическом масштабе (рис. 3), что соответствует теории термоэлектронной эмиссии. Определенная из этой зависимости высота потенциального барьера φ_B составляет $\sim 0.05 \text{ эВ}$.

2) В случае контактов к твердому раствору с концентрацией $N_a - N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ сопротивление контакта также уменьшалось с ростом температуры. Зависимость RT от $1/T$ в интервале температур 300–360 К оказалась линейной в полулогарифмическом масштабе (рис. 4), что соответствует теории термоэлектронной эмиссии. Определенная из этой зависимости высота потенциального барьера φ_B , как и в предыдущем случае, оказалась $\sim 0.05 \text{ В}$. Однако при низких температурах ($T = 90\text{--}190 \text{ К}$) характер этой зависимости изменяется: сопротивление перестает зависеть от температу-

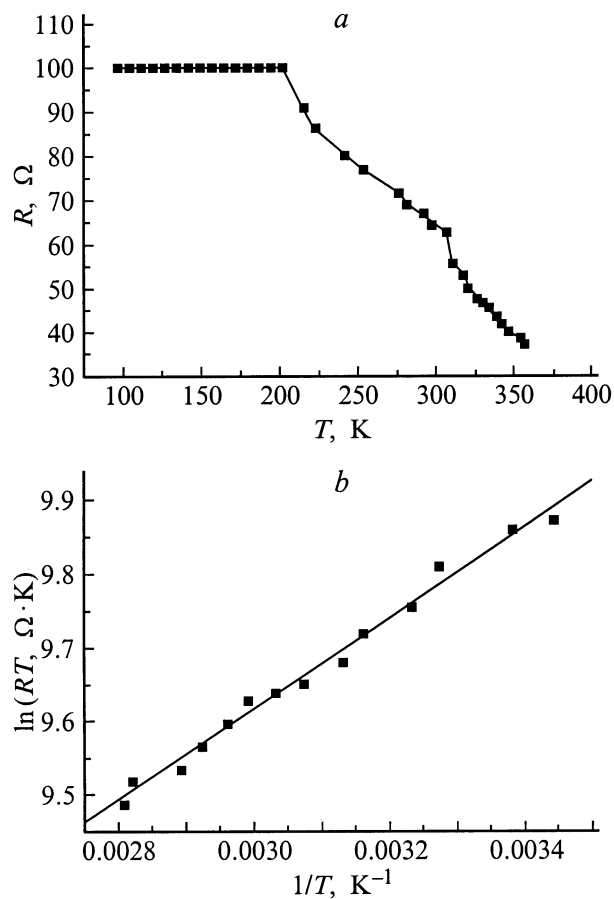


Рис. 4. Зависимость сопротивления R омического контакта $\text{Pd-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ ($N_a - N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$) от температуры T (a) и зависимости RT от $1/T$ в интервале температур 300–360 К (b).

ры, что, по-видимому, свидетельствует об изменении механизма протекания тока в омическом контакте — переходе от термоэлектронной эмиссии к туннелированию. Отметим, что приведенное сопротивление контакта составляло $R_c \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для структур с $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и $R_c \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ для структур с $N_a - N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при 300 К.

Заключение

Итак, барьерный контакт Pd– $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ с высотой потенциального барьера ~ 2.3 эВ после термообработки при 800°C переходит в омический, высота потенциального барьера при этом уменьшается до ~ 0.05 В. Основным механизмом протекания тока в этих омических контактах при $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ является термоэлектронная эмиссия; при $N_a - N_d = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ наблюдается переход от термоэлектронной эмиссии (при высоких температурах) к туннелированию (при низких температурах).

Список литературы

- [1] S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, S. Nagahama. Japan. J. Appl. Phys., **34**, Part 2, L797 (1995).
- [2] M. Asif Khah, J.N. Kuznia, A.R. Bhattarai, D.T. Olson. Appl. Phys. Lett., **62**, 1786 (1993).
- [3] E.V. Kalinina, V.A. Soloviev, A.I. Babanin, M.A. Yagovkina, A.V. Shchukarev. *The Second Conference on High Temp. Electronics (HITEN)* (Manchester, 1997) p. 277.
- [4] J.-S. Jang, I.-S. Chang, H.-K. Kim, T.-Y. Seong, S. Lee, S.-J. Park. Appl. Phys. Lett., **74**, 70 (1999).
- [5] J.-S. Jang, T.-Y. Seong. Appl. Phys. Lett., **76** (19), 2743 (2000).
- [6] E.H. Rhoderick. *Metal–Semiconductor Contacts* (Clarendon Press, Oxford, 1978).
- [7] A.Y.C. Yu. Sol. St. Electron., **13**, 239 (1970).
- [8] 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).
- [9] G.K. Reeves. Sol. St. Electron., **23** (5), 487 (1980).
- [10] *Properties of Advanced Semiconductor Materials*, ed. by M. Levinshstein, S. Rumyantsev and M. Shur (John /Wiley and Sons, 2000) v. 3.
- [11] N.I. Kuznetsov, E.V. Kalinina, V.A. Soloviev, V.A. Dmitriev. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **395**, 837 (1999).
- [12] K. Schiojima, T. Sugahara, S. Sakai. Appl. Phys. Lett., **74** (14), 1936 (1999).

Редактор Л.В. Шаронова

A current mechanism in ohmic contacts Pd–high doped $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$

T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, E.V. Kalinina,
O.V. Konstantinov, A.E. Nikolaev, A.V. Fomin*,
A.E. Cherenkov*

Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
*Crystal Growth Research Center,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract A current mechanism in ohmic contacts Pd–high doped $p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ has been investigated. The $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ alloy with uncompensated acceptor concentration $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ was prepared by the hydride vapor phase epitaxy (HVPE) method. Pd ohmic contacts were obtained by the thermal vacuum evaporation method followed by annealing. It was found that the Pd– $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ barrier contact exhibiting the barrier height of ~ 2.3 V transformed into ohmic contact after annealing. The barrier height reduced to ~ 0.05 V after that process.

It has been shown that the main current mechanism in the Pd– $p\text{-Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ ohmic contact is the thermionic emission for $N_a - N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. For acceptor concentration of $N_a - N_d \approx 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ a transition of the thermionic emission (at high temperature) to tunneling (at low temperature) was observed.