

Механизм протекания тока в омическом контакте к n -4H-SiC

© Т.В. Бланк[¶], Ю.А. Гольдберг, Е.А. Поссе, Ф.Ю. Солдатенков

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

(Получена 18 августа 2009 г. Принята к печати 7 сентября 2009 г.)

Изучалось протекание тока в омическом контакте In- n -4H-SiC ($n \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) на основании зависимости сопротивления контакта, приведенного к единице площади, от температуры. Установлено, что основным механизмом протекания тока является термоэлектронная эмиссия через барьер ~ 0.1 эВ. При этом эффективная постоянная Ричардсона оказалась равной $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}$.

1. Анализ литературных данных

Карбид кремния, в особенности политип 4H-SiC, в настоящее время является основой полупроводниковой высокотемпературной силовой электроники в связи с:

- высоким значением ширины запрещенной зоны (3.23 эВ),
- высокой теплопроводностью (3.7 Вт/см · К),
- высоким значением поля пробоя ((3–5) · 10⁶ В/см),
- высоким значением скорости насыщения электронов (2 · 10⁷ см/с) (все параметры даны для 300 К [1]).

4H-SiC имеет достаточно низкую плотность поверхностных состояний: (2.63–4.67) · 10¹² см⁻² · эВ⁻¹ для Si-плоскости и (4.93–6.58) · 10¹² см⁻² · эВ⁻¹ для C-плоскости [2]. Поэтому в отличие от широко используемых в электронике полупроводников: Si, GaAs, GaP и др. — высота барьера ϕ_B металл-4H-SiC сильно зависит от работы выхода электронов из контактирующего металла Φ_m . В частности, в работах [3,4] получена линейная зависимость ϕ_B от Φ_m , как и следует по теории Шоттки. Данные последних лет для 4H-SiC n -типа в основном подтверждают эту модель. Как видно из табл. 1 [3,5–11], с ростом Φ_m величина ϕ_B возрастает, но слабее, чем предполагается по идеальной теории Шоттки. Отметим, что параметры барьеров Шоттки определялись из $I-U$ и $C-U$ -характеристик по закономерностям, характерным для теории термоэлектронной эмиссии.

Согласно теории Шоттки, барьерный контакт к полупроводникам n -типа образуется, когда работа выхода электронов из металла больше сродства к электрону полупроводника χ_s , т. е. $\Phi_m > \chi_s$, а омический — в случае $\Phi_m < \chi_s$. Поскольку для большинства металлов Φ_m больше, чем сродство электронов к 4H-SiC ($\chi_s = 4.05$ эВ), для создания омических контактов использовались те же самые металлы (или сплавы), которые образуют барьерный контакт ($\Phi_m > \chi_s$), но для которых соответствующая термообработка приводила к образованию новых соединений. Например, для n -4H-SiC использовались Ni [12–14], Ti/Al, Ti/Ni/Ag [6], Au/Ti/Al [15], а для p -4H-SiC применялись Ni/Al, NiTiAl [16]. В случае n -4H-SiC в результате специальной термообработки на

поверхности создавались слои Ni₂Si, Ni₃Si₂, а в приповерхностной области полупроводника появлялись доно-рноподобные вакансии С. В случае p -4H-SiC на поверхности образовывались слои NiAl₃, TiSiC₂. Это приводило к образованию низкоомного омического контакта.

Как известно [17], основными механизмами протекания тока в омическом контакте являются:

- термоэлектронная эмиссия; при этом приведенное к единице площади сопротивление омического контакта R_c уменьшается с ростом температуры T и увеличивается с ростом высоты барьера металл-полупроводник ϕ_B :

$$R_c = \left(\frac{k}{qA^*T} \right) \exp \left(\frac{q\phi_B}{kT} \right). \quad (1)$$

Здесь k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона, A^* — эффективная постоянная Ричардсона;

- полевая эмиссия; R_c не зависит от T и возрастает с ростом высоты барьера металл-полупроводник ϕ_B :

$$R_c \propto \exp \left[\left(\frac{2\sqrt{\epsilon_s \epsilon_0 m^*}}{\hbar} \right) \left(\frac{\phi_B}{N_d^{1/2}} \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, m^* — эффективная масса электрона в полупроводнике, \hbar — постоянная Планка, N_d — концентрация ионизованных примесей в полупроводнике;

Таблица 1. Высота барьера Шоттки металл-4H-SiC

Металл	Работа выхода электронов из металла Φ_m , эВ	Высота барьера ϕ_B , эВ	
Al	4.18–4.28	0.58–0.69	[5]
Ti	3.83–4.33	0.85–1.21	[6]
		1.21–1.25	[7]
Mo	4.6	0.91–1.21	[6]
Cr	4.4–4.6	1.06–1.12	[8]
Ni	5.1–5.2	1.45–1.72	[6]
		1.1–1.45	[9]
Au	5.15	1.68	[3]
Pt	5.43–5.65	1.48–1.58	[10]
		1.4–2.1	[11]

[¶] E-mail: tblank@mail.ioffe.ru, телефон: 292-73-04

Таблица 2. Механизм протекания тока в омическом контакте к *p*-4H-SiC

Металл	Механизм протекания тока	Высота барьера ϕ_B , эВ	
Al/Ti/Pt/Ni	Термоэлектронная эмиссия	0.097	[18]
Ti/Al, Ni/Ti/Al	Термополевая эмиссия	0.4	[19]
Al/Ti	То же	0.82	[20]

— термополевая эмиссия; сопротивление R_c слабо уменьшается с ростом температуры T и увеличивается с ростом высоты барьера металл–полупроводник ϕ_B :

$$R_c \propto \exp\left(\frac{\phi_B}{E_{00} \operatorname{cth}(qE_{00}/jT)}\right), \quad (3)$$

для случая полупроводника *n*-типа критерий Падовани–Стратона E_{00} равен:

$$E_{00} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{N_d}{\varepsilon_s \varepsilon_0 m^*}} = 18.5 \cdot 10^{-15} \sqrt{\frac{N_d}{\varepsilon_{sr} m_r}}, \quad (4)$$

где $m_r = m^*/m_0$ — относительная эффективная масса электрона в полупроводнике, ε_{sr} — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;

— протекание тока по металлическим шунтам; сопротивление R_c возрастает с ростом температуры T .

Механизм протекания тока в омических контактах к полупроводникам с большой плотностью поверхностных состояний (Si, GaAs, GaP), для которых применима модель Бардина, изучался во многих работах, и при различных условиях были установлены практически все возможные механизмы.

Механизм протекания тока в омическом контакте к 4H-SiC с низкой плотностью поверхностных состояний изучался только для кристаллов *p*-типа: он определялся как термоэлектронная или термополевая эмиссия [18–20]. Как видно из табл. 2, высоты барьера металл–полупроводник сильно различались в разных работах. Механизм протекания тока в омических контактах к *n*-4H-SiC в известной нам литературе не изучался.

В настоящей работе мы изучали механизм протекания тока в омических контактах к среднелегированному *n*-4H-SiC. При образовании омического контакта к такому материалу существенную роль играет величина работы выхода электронов из металла (модель Шоттки). Поэтому мы выбрали In — металл с низкой величиной работы выхода электронов (3.97 эВ), которая даже меньше, чем значение сродства к электрону для 4H-SiC (4.05 эВ).

2. Методика эксперимента

Исходным материалом был монокристаллический 4H-SiC с концентрацией электронов $n \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и их подвижностью $\mu_n \approx 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (300 К).

В пластины *n*-4H-SiC впалялся ряд In-контактов в потоке очищенного водорода при 1200°C. Площадь контактов составляла $S \approx 10^{-4} \text{ см}^2$; общая длина пластины была 1.5 см.

После впавления и охлаждения до комнатной температуры измерялись вольт-амперные характеристики в интервале температур 77–420 К между первым и всеми остальными контактами. Точность поддержания температуры в термостате 1 К. Все полученные структуры имели линейную вольт-амперную характеристику.

Для определения сопротивлений контакта R_c определялась зависимость измеренного сопротивления R_{meas} от расстояния между контактами d (рис. 1):

$$R_{\text{meas}} = 2R_c + R_{\text{bulk}} = 2R_c + \frac{d}{qN\mu_n S}. \quad (5)$$

Здесь R_{bulk} — сопротивления толщи полупроводника. Отсечка прямолинейной зависимости $R_{\text{meas}}(d)$ по оси

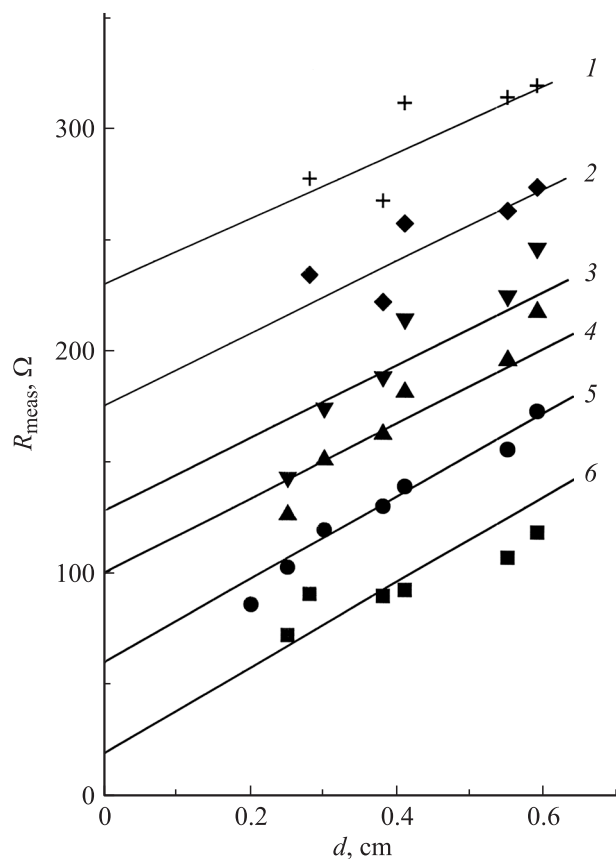


Рис. 1. Зависимость сопротивления структур In–4H-SiC–In с омическими контактами от расстояния между контактами для различных температур, К: 1 — 250, 2 — 260, 3 — 270, 4 — 280, 5 — 300, 6 — 350.

ординат соответствует удвоенному сопротивлению контакта, а наклон этой прямой равен удельному сопротивлению толщи полупроводника $\rho = \frac{1}{qN\mu_n}$.

3. Механизм протекания тока в омическом контакте In–4H-SiC

Для всех пластин с омическими контактами In–4H-SiC-In измерялось сопротивление R_{meas} . Результаты измерений сводятся к следующему:

— при низких температурах $T = 77–200$ К измеряемое сопротивление R_{meas} резко уменьшалось с ростом температуры; при этом величина удельного сопротивления толщи полупроводника ρ также резко падала, что, по-видимому, связано с вымораживанием примесей;

— при температурах $T = 200–350$ К сопротивление омических контактов, приведенное к единице площади, R_c уменьшалось с ростом температуры.

Зависимость R_c от $1/T$ в полулогарифмическом масштабе оказалась линейной (рис. 2), что соответствует теории термоэлектронной эмиссии (1). Согласно этой теории, наклон зависимости $R_c = f(1/T)$ в полулогарифмическом масштабе должен быть пропорционален высоте потенциального барьера ϕ_B . Определенная из сравнения теории и эксперимента высота потенциального барьера ϕ_B оказалась равной 0.1 эВ.

Хотя величина работы выхода электронов из In (3.97 эВ) не превышает значения сродства к электрону для 4H-SiC (4.05 эВ), на контакте In и 4H-SiC остается небольшой потенциальный барьер, который может быть связан с образованием вакансий при сплавлении либо с промежуточным оксидным слоем, который не удалось удалить полностью при термообработке. Отметим, что омический контакт In–4H-SiC образуется и при комнатной температуре, но сопротивление контакта очень велико из-за присутствия толстого оксидного слоя.

Эффективная постоянная Ричардсона, определенная из отсечки зависимости $R_c = f(T)$ (рис. 2), оказалась равной $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ А/см² К. Если принять эффективную массу электронов проводимости в 4H-SiC равной 0.36 эВ [1], то значение эффективной постоянной Ричардсона должно быть 42 А/см² К, что приблизительно на 2 порядка больше величины, определенной из эксперимента. Постоянная Ричардсона для омического контакта к *n*-4H-SiC ранее не определялась, но значения эффективной постоянной Ричардсона, определенные для диодов Шоттки в других работах, были еще меньше: $1.39 \cdot 10^{-3}$ А/см² К для Ni–4H-SiC, $3.83 \cdot 10^{-3}$ А/см² К для Pt–4H-SiC [21] и $4 \cdot 10^{-4}$ А/см² К для Al–4H-SiC [22]. Авторы [21,22] объяснили отличие значений постоянной Ричардсона для диодов Шоттки от теоретических значений квантово-механическим отражением электронов от границы раздела металл–полупроводник, туннелированием через границу и структурными изменениями в контакте металл–4H-SiC. В нашем случае омического контакта

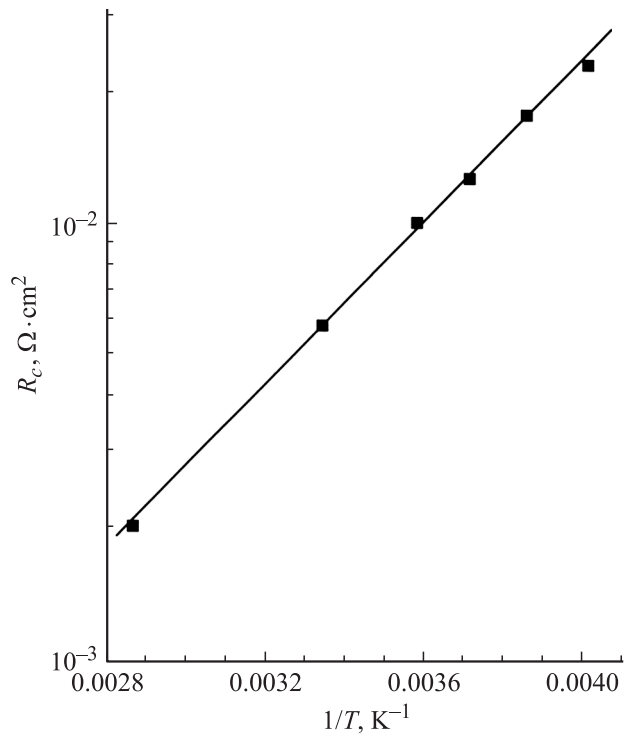


Рис. 2. Зависимость приведенного к единице площади сопротивления омического контакта In–4H-SiC от обратной температуры.

In с 4H-SiC отличие экспериментальной эффективной постоянной Ричардсона от теоретической не настолько велико, как в других работах, и может быть связано с квантово-механическим отражением электронов от границы раздела металл–полупроводник.

Итак, механизм протекания тока в омическом контакте In со среднелегированным *n*-4H-SiC характеризуется термоэлектронной эмиссией.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-02-13552 офис).

Список литературы

- [1] *Properties of Advanced Semiconductor Materials*, ed. by M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur (N. Y., John Wiley and Sons, 2001).
- [2] Shaweta Khanna, Arti Noor, Man Singh Tyagi, Sonnathi Neeleshwar. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 427 (2009).
- [3] A. Itoh, H. Matsunami. *Phys. Status Solidi A*, **162**, 389 (1997).
- [4] A. Itoh, T. Kimoto, H. Matsunami. *IEEE Trans. Electron. Dev. Lett.*, **16**, 280 (1995).
- [5] W.R. Harell, J. Zhang, K.F. Poole. *J. Electron. Mater.*, **31**, 1090 (2002).
- [6] D. Perrone, M. Naretto, S. Ferrero, L. Scaltrito, C.-F. Pirri. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 647 (2009).
- [7] Pavel A. Ivanov, Alexander S. Potapov, Tat'yana P. Samsanova. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 431 (2009).

- [8] C. Koliakoudakis, J. Dontas, S. Karakalos, M. Kayambaki, S. Ladas, G. Konstantinidis, S. Kennou, K. Zekentes. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 651 (2009).
- [9] Irina P. Nikitina, Konstantin V. Vassilevski, A.B. Horsfall, Nicolas G. Wright, Anthony G. O'Neill, S.K. Ray, C. Mark Johnson. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 577 (2009).
- [10] Hyoung Jin Im, B. Kaczer, J.P. Pelz, Jin Ming Chen, W.J. Choyke. *Mater. Sci. Forum*, **264–268**, 813 (1998).
- [11] O. Shigiltchhoff, T. Kimoto, D. Hoodgood, et al. In: *Technical Digest of International Conference on SiC and Related Materials* (Tsukuba, Japan, 2001) We-B-23, p. 291C.
- [12] S.Y. Han, N.K. Kim, E.D. Kim, J.L. Lee. *Silicon Carb. Rel. Mater.*, 2001 — *Mater. Sci. Forum*, **389–393**, 897 (2002).
- [13] S. Liu, K. Reinhardt, C. Severt, J. Scofield. *Silicon Carb. Rel. Mater.* 1995 — *Inst. Phys. Conf. Ser.*, **142**, 589 (1996).
- [14] Weijie Lu, W.C. Mitchel, G.R. Landis, T.R. Crenshaw, W. Eugene Collins. *Sol. St. Electron.*, **47**, 2001 (2003).
- [15] Shu-Cheng Chang, Shiu-Jinn Wang, Kai-Ming Uang, Bor-Wen Liou. *Sol. St. Electron.*, **49**, 1937 (2005).
- [16] Ryohei Konishi, Ryuichi Yasukochi, Osamu Nakatsuka, Yasuo Koide, Miki Moriyama, Masanori Murakami. *Mater. Sci. Eng. B*, **98**, 286 (2003).
- [17] Т.В. Бланк, Ю.А. Гольдберг. *ФТП*, **41**, 1281 (2007).
- [18] R. Kakanokov, L. Kassamakova, I. Kassamakov, K. Zekentes, N. Kuznetsov. *Mater. Sci. Eng. B*, **80**, 374 (2001).
- [19] Kazuhiro Ito, Susumu Tsukimoto, Masanori Murakami. *Sci. Techn. Adv. Mater.*, **7**, 496 (2006).
- [20] A. Scorzoni, F. Moscatelli, A. Poggi, G.C. Cardinali, R. Nipoti. *Silicon Carb. Rel. Mater.*, 2004 — *Mater. Sci. Forum*, **457–460**, 881 (2004).
- [21] V. Saxena, Jian Nong Su, A.J. Steckl. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **46**, 456 (1999).
- [22] O. Korolkov, N. Kuznetsova, T. Rang, A. Syrkin, V. Dmitriev. *Mater. Sci. Forum*, **556–557**, 737 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

Current flow mechanism in Ohmic contact for *n*-4H-SiC

*T.V. Blank, Yu.A. Goldberg, E.A. Posse,
F.Yu. Soldatenkov*

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

Abstract Current flow mechanism in Ohmic contacts In-*n*-4H-SiC ($n \approx 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) have been investigated based on temperature dependencies of the specific contact resistivity. The main current flow mechanism was the thermionic emission. The derived potential barrier height was $\sim 0.1 \text{ eV}$. The effective Richardson constant was $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ A/cm}^2 \text{ K}$.