

## Влияние быстрой термообработки на вольт-амперные характеристики 4H-SiC-диодов с барьером Шоттки

© П.А. Иванов<sup>¶</sup>, Н.Д. Ильинская, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, А.В. Афанасьев\*, В.А. Ильин\*

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

\* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),  
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 4 июня 2012 г. Принята к печати 11 июня 2012 г.)

Исследовано влияние быстрого термического отжига (температура 600–800°C, длительность 2 мин) на прямые вольт-амперные характеристики 4H-SiC-диодов с барьером Шоттки. В качестве металла контактов Шоттки использовались вольфрам, никель, хром и молибден, осажденные электронно-лучевым напылением в вакууме. Для разных металлов обнаружен разный характер влияния термообработки на высоту барьера и на разброс параметров контактов, характеризующий степень их однородности.

### 1. Введение

Высоковольтные диоды Шоттки (ДШ) на основе карбида кремния политипа 4H (4H-SiC) в последнее время находят все более широкое применение в устройствах силовой электроники. В то же время технология изготовления диодов совершенствуется с целью повышения термостабильности и надежности диодов. Одной из проблем в технологии остается формирование воспроизводимых по электрическим параметрам барьеров Шоттки (БШ). Для стабилизации свойств БШ были предложены различные варианты предварительной подготовки поверхности перед нанесением металла, а также быстрая термообработка (RTA, rapid thermal annealing) нанесенных барьерных контактов в вакууме или инертной среде. Во многих работах было показано, что RTA способствует структурной модификации границы раздела металл–4H-SiC, а это приводит в свою очередь к заметному изменению электрических характеристик контактов [1–5]. Говоря о характеристиках 4H-SiC БШ, необходимо иметь в виду, что вследствие разного рода неоднородностей структуры обычно наблюдается заметный разброс их электрических параметров (см., например, [6–8]). Таким образом, по разбросу параметров косвенно можно судить об однородности структуры контактов. В настоящей работе проведено исследование влияния RTA (2 мин, 600–800°C) на электрические характеристики 4H-SiC ДШ с разными металлами в качестве БШ (W, Cr, Ni, Mo). Главная цель исследования состояла в том, чтобы сравнить для разных металлов, нанесенных в одних и тех же условиях, влияние RTA на высоту барьера и на степень однородности контактов.

### 2. Образцы и методика исследований

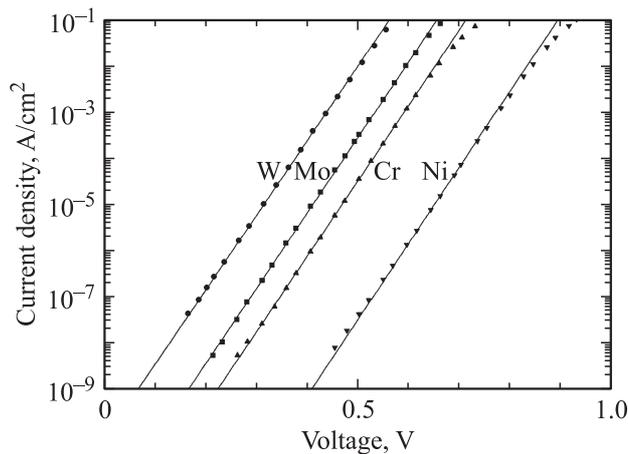
Экспериментальные ДШ изготавливались на основе коммерческих пластин 4H-SiC с эпитаксиальной  $n^+$  (подложка)– $n$ -структурой. Удельное сопротивление

$n^+$ -подложек составляет  $\sim 0.02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , а их толщина  $\sim 350 \text{ мкм}$ . Выращенные с помощью CVD-эпитаксии  $n$ -слои имеют толщину 5–20 мкм и концентрацию доноров  $10^{15}–10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Технологическая последовательность изготовления диодов включала в себя следующие операции. Вначале поверхность эпитаксиального слоя пассивировалась слоем собственного термического окисла, выращенного в потоке сухого кислорода при температуре 1150°C в течение 9 ч. Затем формировался никелевый омический контакт к шлифованной с обратной стороны подложке (катод) путем ионного распыления Ni-мишени (толщина слоя Ni около 100 нм) с последующим отжигом в вакууме при температуре 950°C в течение 15 мин. Анодные барьерные контакты формировались с помощью электронно-лучевого распыления соответствующих металлов в высоком вакууме (толщина слоя около 100 нм). Непосредственно перед напылением проводилось травление окисла и очистка поверхности с помощью ионной ( $\text{Ar}^+$ ) пушки. После нанесения барьерных контактов проводился изохронный ( $\sim 2$  мин) быстрый отжиг структур в вакууме при разных температурах в диапазоне 600–800°C. Изготовленные диоды были предназначены для измерений только прямых вольт-амперных характеристик (ВАХ), поэтому специальная охранная система (для повышения напряжения пробоя в обратном направлении) в них не формировалась. Поскольку достоверную информацию об изменении свойств контактов в результате термообработки можно получить лишь на основе анализа статических данных, измерения ВАХ проводились на большом количестве диодов — не менее 50 штук в каждой группе.

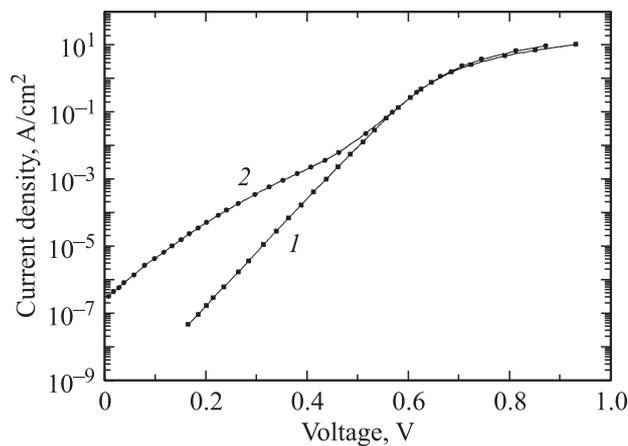
### 3. Результаты и обсуждение

В идеализированных контактах Шоттки на основе такого широкозонного полупроводника, как 4H-SiC, механизм протекания тока должен быть чисто термоэмиссионным. При малых плотностях прямого тока ВАХ должна описываться экспоненциальной зависимостью

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



**Рис. 1.** Прямые ВАХ наилучших  $4H$ -SiC БШ (до термообработки): W —  $\Phi_{\text{Beff}} = 0.97$  эВ,  $n = 1.06$ ; Mo —  $\Phi_{\text{Beff}} = 1.07$  эВ,  $n = 1.05$ ; Cr —  $\Phi_{\text{Beff}} = 1.12$  эВ,  $n = 1.05$ ; Ni —  $\Phi_{\text{Beff}} = 1.3$  эВ,  $n = 1.04$ .



**Рис. 2.** Прямые ВАХ двух вольфрамовых  $4H$ -SiC БШ (до термообработки), иллюстрирующие проявление неоднородности структуры: 1 — „идеальная“ ВАХ, 2 — ВАХ с избыточным током.

вида

$$I = SA^* \cdot T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_{\text{Beff}}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (1)$$

где  $q$  — элементарный заряд,  $S$  — площадь контакта,  $A^*$  — эффективная константа Ричардсона,  $\Phi_{\text{Beff}}$  — эффективная высота барьера,  $n$  — коэффициент идеальности,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Как было отмечено выше, реальные контакты Шоттки на основе  $4H$ -SiC имеют, как правило, некоторый разброс параметров ( $\Phi_{\text{Beff}}$  и  $n$ ) по пластине. Кроме того, зачастую на ВАХ проявляются „утечки“ в виде дополнительной (избыточной) компоненты тока.

Изготовленные для исследований  $4H$ -SiC БШ в большей части имели прямые ВАХ, близкие к идеальным (рис. 1). Высота барьера варьировалась для разных металлов от 1 до 1.3 эВ, а коэффициент идеальности

в пределах 1.04–1.06. Однако в части изготовленных образцов на измеренных ВАХ обнаруживались избыточные токи, обусловленные неоднородностью структуры контакта (см. пример на рис. 2). Неидеальности разного рода — утечки, разброс высоты барьера и коэффициента идеальности — приводят к разбросу падения напряжения при некоторой фиксированной величине прямого тока. Поэтому изменение величины разброса падения напряжения в результате отжига может служить критерием улучшения (ухудшения) однородности границы раздела, а изменение средней величины падения напряжения — мерой изменения средней высоты барьера.

На рис. 3 показаны нормированные гистограммы распределения вольфрамовых БШ, термообработанных при разных температурах, по величинам падения напряжения, измеренного при прямом токе 100 нА. Можно отметить следующие характерные особенности показанных гистограмм:

- при увеличении температуры отжига среднее падение напряжения уменьшается и стремится к насыщению при  $700^\circ\text{C}$ ; это свидетельствует о соответствующем уменьшении средней высоты барьера;

- во всех случаях наблюдается заметный разброс падения напряжения, который имеет близкий к гауссовому характер распределения;

- после отжига при  $600^\circ\text{C}$  величина разброса увеличивается (рис. 3, *b*); это свидетельствует о том, что однородность структуры контактов ухудшается по сравнению с неотожженными контактами;

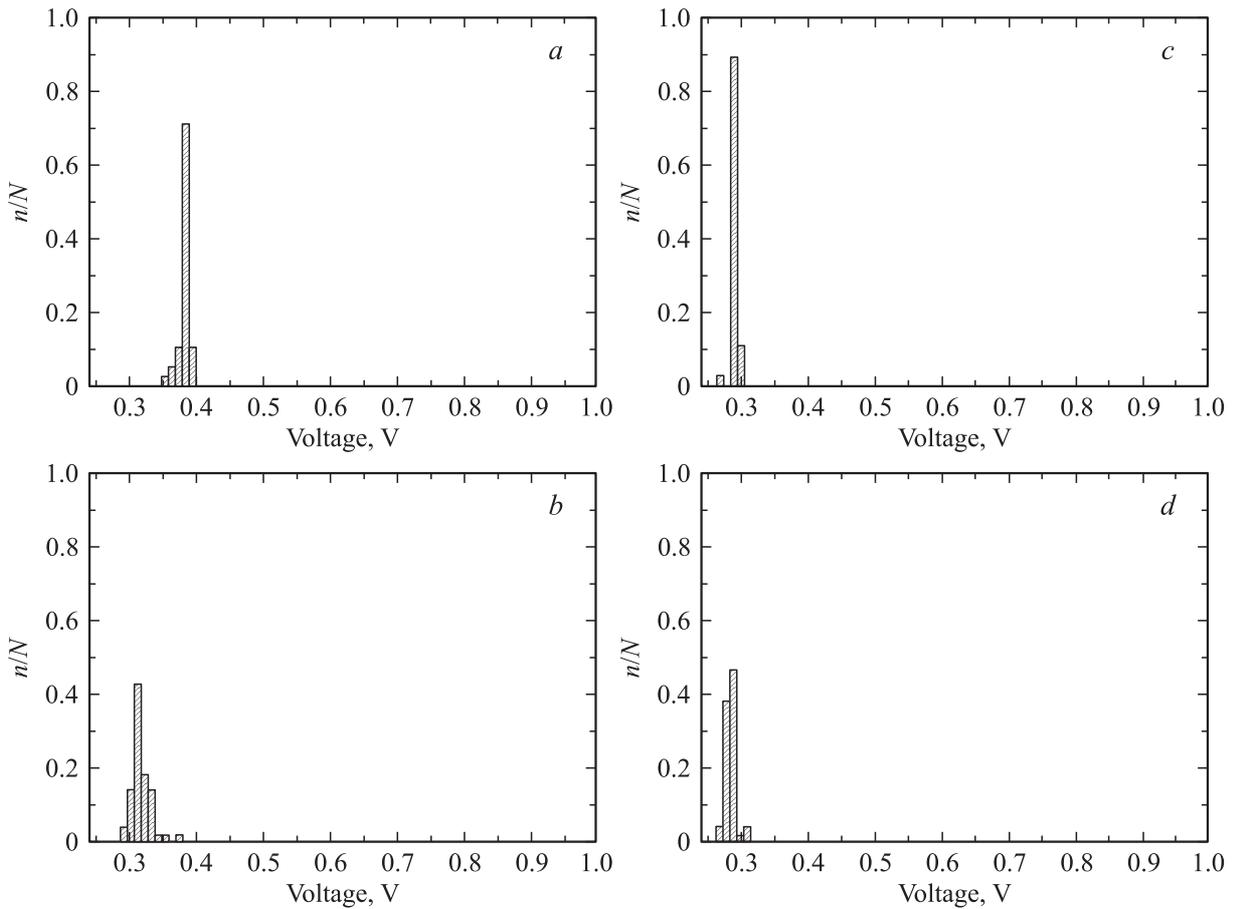
- после отжига при  $700^\circ\text{C}$  величина разброса резко снижается и проходит через минимум (рис. 3, *c*); это свидетельствует о том, что однородность структуры контактов становится выше по сравнению с неотожженными контактами;

- после отжига при  $800^\circ\text{C}$  величина разброса вновь увеличивается (рис. 3, *d*), т.е. однородность структуры контактов вновь уменьшается.

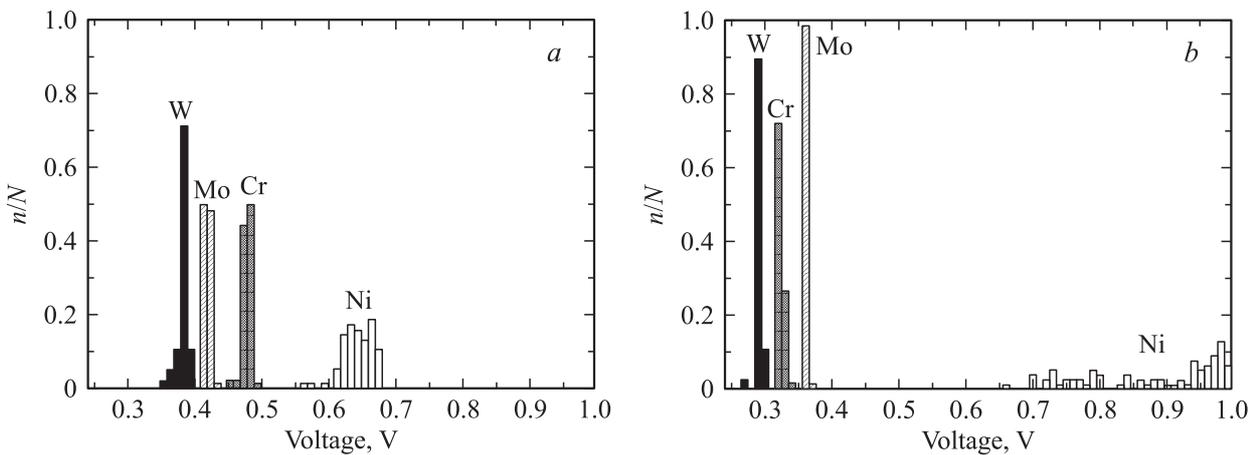
Таким образом, в случае вольфрамовых контактов Шоттки оптимальным (по критерию достижения наибольшей однородности) является отжиг при температуре  $700^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 показаны результаты измерений падения напряжения (при прямом токе 100 мА) для Mo-, Cr- и Ni-контактов, не подвергнутых термообработке (рис. 4, *a*) и отожженных при температуре  $700^\circ\text{C}$  (рис. 4, *b*). Хромовые и молибденовые контакты показали поведение, аналогичное наблюдаемому для вольфрамовых контактов: после отжига средняя высота барьера падает, а однородность структуры контактов существенно повышается (особенно это относится к молибденовым контактам; ранее для Mo-контактов сообщалось о существенном снижении токов утечки в обратном направлении в результате RTA при  $600^\circ\text{C}$  [9]). В то же время никелевые контакты показали противоположную тенденцию: средняя высота барьера увеличивается, а однородность структуры контакта существенно снижается.

Полученные результаты могут быть прокомментированы следующим образом. Мы полагаем, что в случае



**Рис. 3.** Нормированные гистограммы распределения вольфрамовых БШ, термообработанных при разных температурах (*a* — без отжига, *b* — 600°C, *c* — 700°C, *d* — 800°C), по величинам падения напряжения, измеренного при прямом токе 100 нА.



**Рис. 4.** Нормированные гистограммы распределения необработанных (*a*) и термообработанных при 700°C (*b*) 4H-SiC БШ по величинам падения напряжения, измеренного при прямом токе 100 нА.

вольфрама, хрома и молибдена заметной химической реакции металлов с карбидом кремния в результате RTA при температуре 700°C еще не происходит [10], а наблюдаемые уменьшение высоты барьера и улучшение однородности контактов обусловлены гомогенизацией границы раздела и модификацией поверхностных состоя-

ний (ПС). Косвенно о том, что снижение высоты барьера обусловлено модификацией ПС, говорит тот факт, что в нашем случае высота Мо-барьера в результате отжига уменьшается, а, например, по данным работы [9] она, напротив, увеличивается. Таким образом, высота барьера и тенденция ее изменения при отжиге определяются

способом предварительной подготовки поверхности перед нанесением металла. В случае никеля химическая реакция с образованием силицида никеля ( $\text{Ni}_2\text{Si}$ ) при температуре  $700^\circ\text{C}$  протекает уже достаточно интенсивно [11], что приводит к увеличению средней высоты барьера. Однако для образования сплошного силицида (и соответственно улучшения однородности структуры контактов) все же необходимы более высокие температуры и (или) увеличение длительности отжига.

## Список литературы

- [1] F. Roccaforte, F. La Via, V. Raineri, P. Musumeci, L. Calcagno, G.G. Condorelli. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, **77**, 827 (2003).
- [2] F. Roccaforte, F. La Via, A. Baeri, V. Raineri, L. Calcagno, F. Mangano. *J. Appl. Phys.*, **96**, 4313 (2004).
- [3] Q. Zhang, T.S. Sudarshan. *J. Electron. Mater.*, **30**, 1466 (2001).
- [4] K.V. Vassilevski, A.B. Horsfall, C.M. Johnson, N.G. Wright, A.G. O'Neil. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **49**, 947 (2002).
- [5] P. Perrone, M. Naretto, S. Ferrero, L. Scaltrito, C.F. Pirri. *Mater. Sci. Forum*, **615–617**, 647 (2009).
- [6] D.J. Ewing, Q. Wahab, R.R. Ciecchonski, M. Syvajarvi, R. Yakimova, L.M. Porter. *Semicond. Sci. Technol.*, **22**, 1287 (2007).
- [7] B.J. Skromme, E. Luckowski, K. Moore, M. Bhatnagar, C.E. Weitzel, T. Gehoski, D. Ganser. *J. Electron. Mater.*, **29**, 376 (2000).
- [8] А.С. Потапов, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова. *ФТП*, **43**, 640 (2009).
- [9] T. Nakamura, T. Miyanagi, H. Tsuchida, I. Kamata, T. Jikimoto, K. Izumi. *Mater. Sci. Forum*, **483–485**, 721 (2005).
- [10] А.В. Афанасьев, В.А. Ильин, И.Г. Казарин, А.А. Петров. *ЖТФ*, **71**, 78 (2001).
- [11] S. Ferrero, A. Albonico, U.M. Meotto, G. Rambola, S. Porro, F. Giorgis, D. Perrone, L. Scaltrito, E. Bontempi, L.E. Depero, G. Richieri, L. Merlin. *Mater. Sci. Forum*, **483–485**, 733 (2005).

Редактор Л.В. Беляков

## Effect of rapid thermal annealing on current-voltage characteristics of 4H-SiC Schottky diodes

*P.A. Ivanov, N.D. Il'inskaya, A.S. Potapov, T.P. Samsonova, A.V. Afanas'ev\*, V.A. Il'in\**

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

\* St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,  
197376 St. Petersburg, Russia

**Abstract** W, Ni, Cr and Mo Schottky contacts were formed by electron beam evaporation on 4H-SiC surfaces and subjected to rapid thermal annealing at various temperatures ( $600\text{--}800^\circ\text{C}$ ). The diodes fabricated were characterized via measurements of forward current — voltage characteristics. For various metals, different effect of rapid thermal annealing was found on the barrier height and diode parameters spread that characterize homogeneity of the Scottky contacts.