

Влияние отжига на эффективную высоту барьера и фактор неидеальности никелевых контактов Шоттки к 4H-SiC

© А.С. Потапов, П.А. Иванов[¶], Т.П. Самсонова

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

(Получена 29 сентября 2008 г. Принята к печати 7 октября 2008 г.)

Исследовано влияние отжига на электрические свойства 50 никелевых контактов Шоттки, сформированных на одной пластине 4H-SiC. Показано, что отжиг при температуре 200°C в течение 1 ч способствует гомогенизации гетерограницы металл–полупроводник, что приводит к уменьшению разброса параметров контактов — фактора неидеальности и эффективной высоты барьера. При более высоких температурах отжига (350–450°C) разброс этих параметров вновь увеличивается, по-видимому, из-за локального химического взаимодействия никеля с карбидом кремния.

PACS: 73.30.+y, 73.40.Ei, 73.40.Ns

1. Введение

В настоящее время высоковольтные (300–1200 В) диоды Шоттки на основе карбида кремния политипа 4H (4H-SiC) уже находят широкое практическое применение в импульсных преобразователях напряжения разных типов. Тем не менее исследования свойств барьеров Шоттки (БШ) на 4H-SiC и исследования влияния на эти свойства технологии изготовления БШ продолжают довольно интенсивно. Барьеры Шоттки на 4H-SiC нередко оказываются неидеальными, что является следствием различных неоднородностей структуры контакта. В частности, на характеристики БШ на 4H-SiC могут оказывать влияние такие факторы, как выход пор и дислокаций на поверхность эпитаксиального слоя [1], модификация поверхности в результате постимплантационного отжига охранных колец [2,3], модификация поверхности в результате предварительного травления [4] и окисления поверхности эпитаксиального слоя перед нанесением металла [5], образование тонкого промежуточного слоя между металлом и SiC [6]. Кроме того, очень существенное влияние на свойства контактов оказывает термический отжиг БШ, уже сформированных на поверхности эпитаксиального слоя [7–9]. Как следствие, универсальных рекомендаций по формированию БШ на 4H-SiC пока нет. Важно также и то, что свойства дискретных БШ, сформированных в виде матрицы на пластине 4H-SiC, варьируются от контакта к контакту, что является дополнительным фактором, объясняющим значительный разброс имеющихся в литературе данных по характеристикам БШ на 4H-SiC.

В настоящей работе проведено исследование прямых вольт-амперных характеристик (ВАХ) БШ, сформированных на 4H-SiC электронно-лучевым испарением никеля и отожженных при температурах 200–450°C в вакууме. Из прямых ВАХ определялись эффективная высота барьера и фактор неидеальности БШ. Цель работы заключалась в исследовании влияния темпера-

туры отжига на эти параметры и на их разброс для 50 дискретных структур на пластине.

2. Экспериментальные образцы

Исследованные БШ изготавливались с использованием коммерческой пластины 4H-SiC *n*-типа проводимости (удельное сопротивление 0.02 Ом·см) с выращенным на поверхности (0001) Si эпитаксиальным *n*-слоем. Концентрация доноров (азот) в *n*-слое толщиной 12 мкм составляла $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Вначале поверхность эпитаксиального слоя была пассивирована слоем собственного окисла SiO₂, выращенного в потоке сухого кислорода при температуре 1150°C в течение 9 ч. Далее формировался никелевый омический контакт на шлифованной обратной стороне подложки путем ионного распыления Ni-мишени (толщина слоя Ni ~ 100 нм) с последующим отжигом в вакууме при температуре 950°C в течение 15 мин. Контакты Шоттки площадью $7.1 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ формировались электронно-лучевым напылением никеля в высоком вакууме (толщина слоя Ni ~ 150 нм). Для этого в термическом окисле предварительно вскрывались окна путем его травления в HF с последующей отмывкой поверхности в деионизованной воде. Сразу после изготовления структур проводились измерения ВАХ на 50 дискретных БШ. Затем пластина последовательно отжигалась в вакууме при температурах 200, 350 и 450°C (в течение 1 ч на каждой стадии). После каждой стадии проводились измерения ВАХ на одних и тех же 50 выбранных контактах.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Вольт-амперную характеристику прямосмещенного БШ обычно аппроксимируют экспоненциальной зависи-

[¶] E-mail: Pavel.Ivanov@mail.ioffe.ru

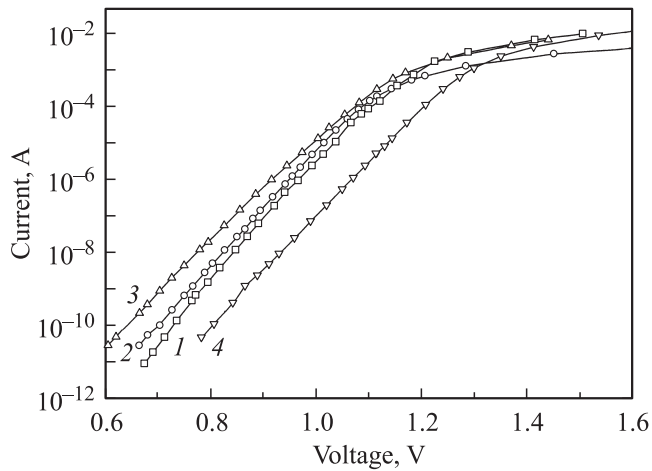


Рис. 1. Прямые ВАХ одного из БШ на 4H-SiC: 1 — до отжига, 2, 3, 4 — после отжига при $T = 200, 350, 450^\circ\text{C}$ соответственно.

мостью вида

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

где I — ток, V — напряжение смещения, q — элементарный заряд, S — площадь контакта, A^* — эффективная константа Ричардсона, Φ_{Beff} — эффективная

высота барьера, n — коэффициент неидеальности, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Для идеального контакта Шоттки коэффициент n близок к единице (как правило, $n = 1.01-1.03$, отличен от 1 из-за влияния сил изображения на высоту барьера).

На рис. 1 показаны ВАХ одного из изготовленных БШ на 4H-SiC до отжига и после каждой стадии отжига. В широком интервале токов от 10^{-11} до 10^{-4} А измеренные ВАХ представляют собой экспоненты, которые могут быть аппроксимированы формулой (1). Как видно, в результате отжигов ВАХ претерпевают существенные изменения: изменяется как эффективная высота барьера Φ_{Beff} , так и коэффициент неидеальности n .

После аппроксимации экспериментальных ВАХ каждого из 50 выбранных контактов были построены гистограммы распределения n и Φ_{Beff} , которые показаны на рис. 2 и 3 соответственно (до отжига и после каждой стадии отжига).

Из приведенных гистограмм видно:

- во всех случаях средний коэффициент неидеальности больше единицы, а разброс достигает заметной величины (более 10%);

- отжиг при 200°C приводит к небольшому уменьшению среднего значения коэффициента неидеальности \bar{n} ($\bar{n} = 1.12$ до отжига и 1.09 после отжига) и увеличению

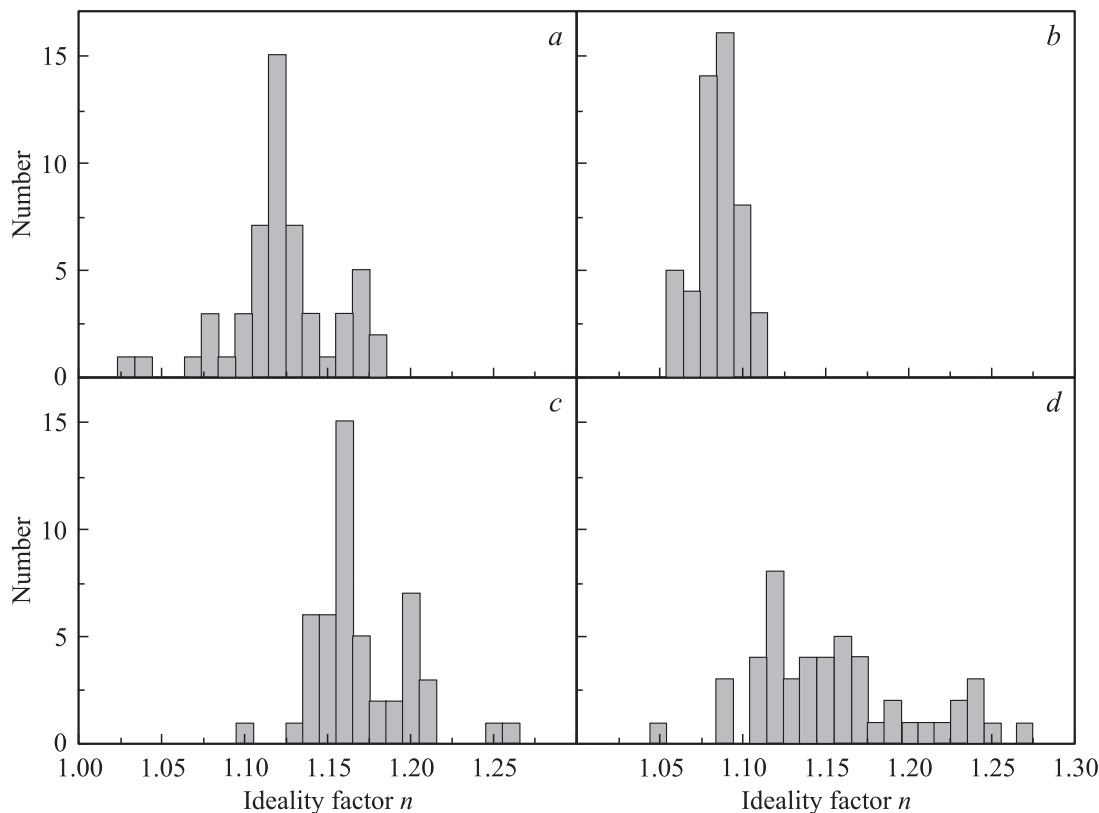


Рис. 2. Гистограммы распределения фактора неидеальности для 50 БШ на 4H-SiC до отжига (a) и после отжига при $T = 200$ (b), 350 (c), 450°C (d).

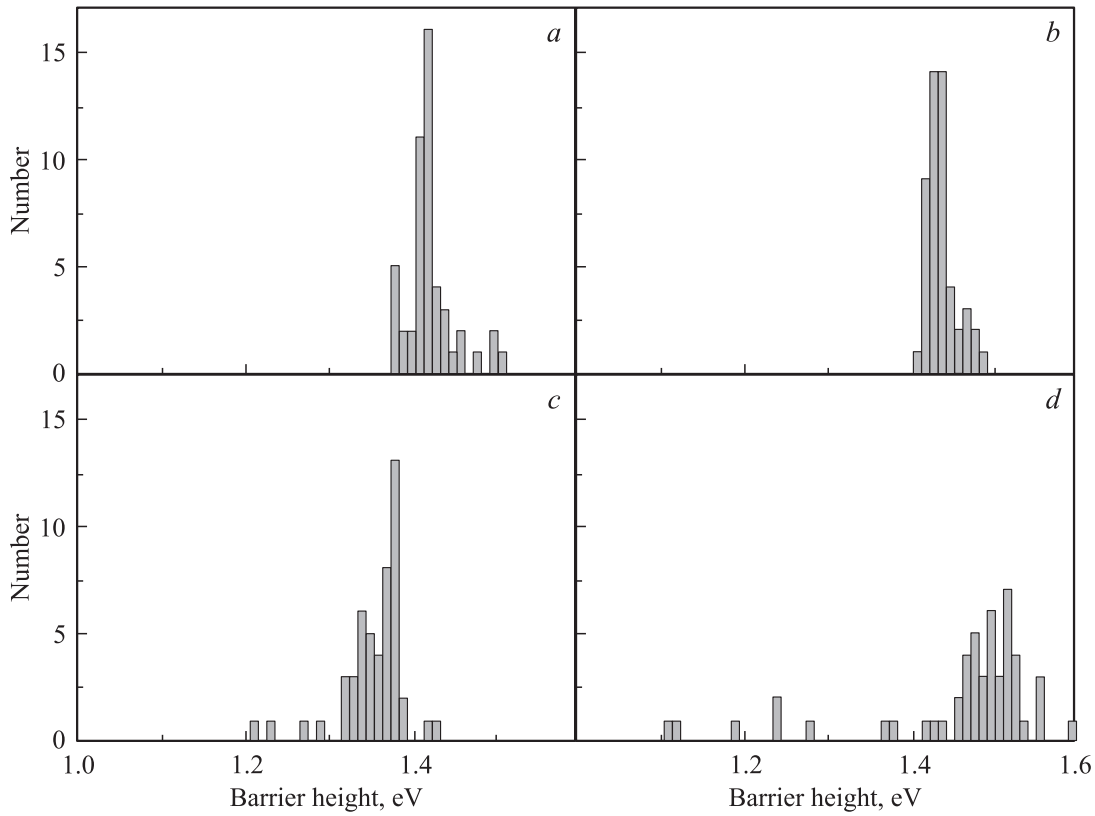


Рис. 3. Гистограммы распределения высоты потенциального барьера для 50 БШ на 4H-SiC до отжига (*a*) и после отжига при $T = 200$ (*b*), 350 (*c*), 450°C (*d*).

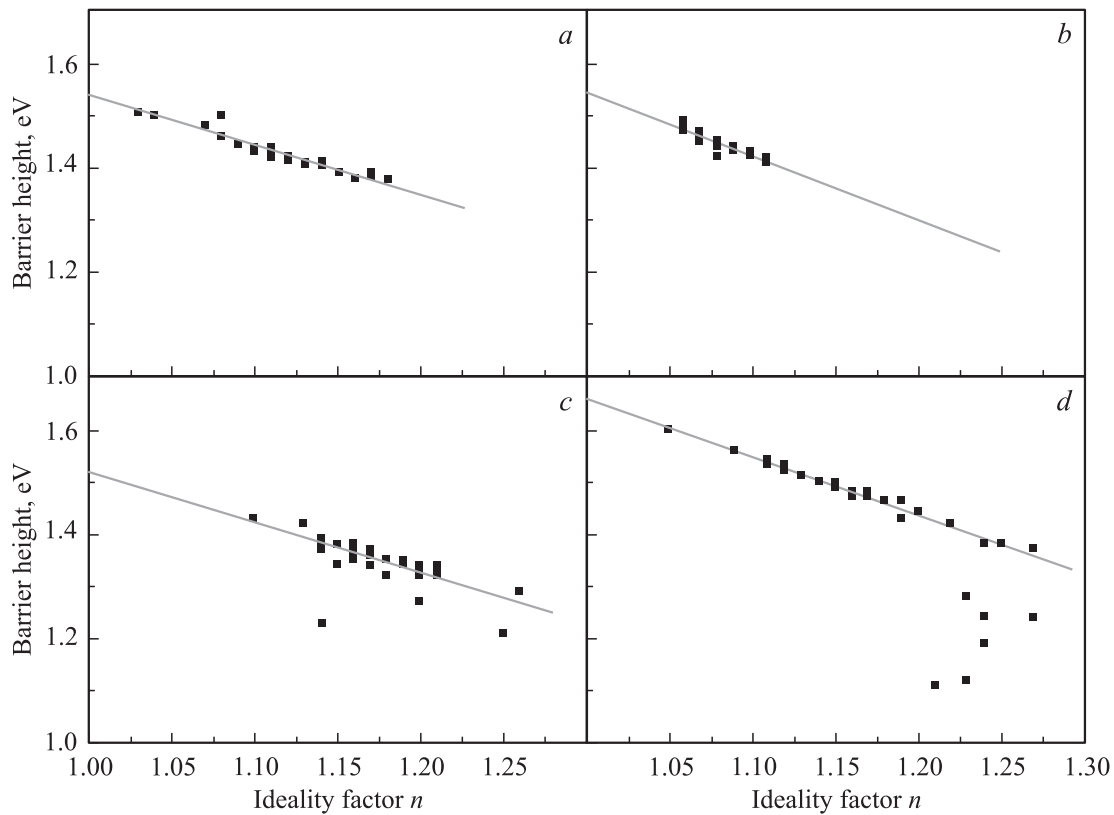


Рис. 4. Экспериментальные значения $\Phi_{\text{вeff}}$ и n для 50 БШ до отжига (*a*) и после отжига при $T = 200$ (*b*), 350 (*c*), 450°C (*d*).

средней высоты барьера $\bar{\Phi}_{B\text{eff}}$ ($\bar{\Phi}_{B\text{eff}} = 1.42$ эВ до отжига и 1.44 эВ после отжига);

– отжиг при 200°C приводит к заметному уменьшению разброса как коэффициента неидеальности ($n = 1.03\text{--}1.18$ до отжига, $n = 1.06\text{--}1.11$ после отжига), так и эффективной высоты барьера ($\Phi_{B\text{eff}} = 1.38\text{--}1.51$ эВ до отжига, $\Phi_{B\text{eff}} = 1.41\text{--}1.49$ эВ после отжига);

– отжиг при 350°C в целом негативно сказывается на характеристиках БШ — среднее значение коэффициента неидеальности становится больше, чем до отжига, а эффективная высота барьера меньше; кроме того, вновь возрастает разброс как n , так и $\Phi_{B\text{eff}}$;

– отжиг при 450°C еще более увеличивает разброс коэффициента неидеальности и его среднее значение;

– отжиг при 450°C приводит к увеличению средней высоты барьера по сравнению с неотожженными структурами.

Полученные результаты показывают, что отжиг при температуре 200°C приводит к гомогенизации структуры никелевых контактов и является оптимальным для достижения наименьшего разброса параметров БШ. Следует отметить, что эти результаты в целом совпадают с данными работы [8], в которой оптимальная температура отжига никелевых контактов Шоттки к $4H\text{-SiC}$ также составляет $\sim 200^\circ\text{C}$. В работе [7] показано, что при отжиге никелевых БШ при температурах выше 600°C на гетерогранице образуется сплошной силицид никеля, приводящий к большей величине барьера по сравнению с никелем. Как мы полагаем, локальные реакции образования силицидов начинаются уже при температурах выше $350\text{--}400^\circ\text{C}$, что приводит к возникновению неоднородной структуры металла и к увеличению средней высоты барьера.

Ранее было показано, что в диодах Шоттки на $4H\text{-SiC}$ эффективная высота барьера коррелирует с коэффициентом неидеальности: чем больше n , тем меньше $\Phi_{B\text{eff}}$ [10,11]. Такую корреляцию обычно связывают с латеральной неоднородностью высоты барьера в пределах площади контакта [12]. На рис. 4 показаны экспериментальные данные $\Phi_{B\text{eff}}(n)$ для 50 исследованных БШ (до отжига и после каждой стадии отжига). Как видно, экспериментальные данные неплохо описываются линейными зависимостями, экстраполяция которых к $n = 1$ позволяет определить высоту барьера Φ_B для „идеальной“ структуры без неоднородностей. До отжига и после отжига при температурах до 350°C $\Phi_B \approx 1.55$ эВ. Эта величина совпадает с высотой барьера близких к идеальному БШ $\text{Ni-}4H\text{-SiC}$ [13,14]. В то же время при повышении температуры отжига до 450°C высота барьера, полученная экстраполяцией, составляет $\Phi_B \approx 1.65$ эВ, что близко к высоте барьера идеального силицидного контакта [15].

4. Заключение

В работе показано, что отжиг никелевых БШ при температуре $\sim 200^\circ\text{C}$ способствует гомогенизации границы раздела металл–полупроводник и приводит тем самым

к улучшению их электрических характеристик, главным образом к уменьшению разброса параметров БШ по пластине. Из результатов работы следует, что более высокие температуры отжига могут быть целесообразными только при необходимости повышения высоты барьера за счет формирования силицидного контакта, образующегося при взаимодействии никеля с карбидом кремния при температурах выше 600°C .

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.516.12.6009) и РФФИ (грант № 07-02-13529-офи-ц).

Список литературы

- [1] D.J. Ewing, L.M. Porter, Q. Wahab, X. Ma. *J. Appl. Phys.*, **101**, 114 514 (2007).
- [2] W. Bahng, H.J. Cheong, I.H. Kang, S.J. Kim, S.C. Kim, S.-J. Joo, N.-K. Kim. *Mater. Sci. Forum*, **556–557**, 595 (2007).
- [3] Y. Negoro, K. Katsumoto, T. Kimoto, H. Matsunami. *Mater. Sci. Forum*, **457–460**, 933 (2004).
- [4] X. Ma, P. Sadagopan, T.S. Sudarshan. *Phys. Status Solidi A*, **203** (3), 643 (2006).
- [5] Q. Wahab, T. Kimoto, A. Ellison, C. Hallin, M. Tuominen, R. Yakimova, A. Henry, J.P. Bergman, E. Janzen. *Appl. Phys. Lett.*, **72** (4), 445 (1998).
- [6] П.А. Иванов, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова. *ФТП*, **43** (2), 197 (2009).
- [7] F. Roccaforte, F. La Via, V. Raineri, P. Musumeci, L. Calcagno, G.G. Condorelli. *Appl. Phys. A*, **77**, 827 (2003).
- [8] K. Vassilevski, I. Nikotina, P. Bhatnagar, A. Horsfall, N. Wright, A.G. O'Neill, M. Uren, K. Hilton, A. Munday, A. Hydes, C.M. Johnson. *Mater. Sci. Forum*, **527–529**, 931 (2006).
- [9] Q. Zhang, T.S. Sudarshan. *J. Electron. Mater.*, **30** (11), 1466 (2001).
- [10] D. Defives, O. Noblanc, C. Dua, C. Brylinski, M. Barthula, V. Aubry-Fortuna, F. Meyer. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **46** (3), 449 (1999).
- [11] B.J. Skromme, E. Luckowski, K. Moore, M. Bhatnagar, C.E. Weitzel, T. Gehoski, D. Ganser. *J. Electron. Mater.*, **29** (3), 376 (2000).
- [12] R.F. Schmitsdorf, T.U. Kampen, W. Monch. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **15** (4), 1221 (1997).
- [13] D.J. Ewing, Q. Wahab, S. Tumakha, L.J. Brillson, X.Y. Ma, T.S. Sudarshan, L.M. Porter. *Mater. Sci. Forum*, **527–529**, 911 (2006).
- [14] A. Kestle, S.P. Wilks, P.R. Dunstan, M. Pritchard, G. Pope, A. Koh, P.A. Mawby. *Mater. Sci. Forum*, **338–342**, 1025 (2000).
- [15] F. Roccaforte, F. La Via, V. Raineri. *J. Appl. Phys.*, **93** (11), 9137 (2003).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of annealing on effective barrier height and ideality factor of nickel Schottky contacts to 4H-SiC

A.S. Potapov, P.A. Ivanov, T.P. Samsonova

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

Abstract The effect of thermal annealing on electrical properties of 50 nickel Schottky contacts formed on a 4H-SiC epi-wafer is reported. It is shown that thermal annealing at 200°C for 1 h favours the homogenization of Ni/4H-SiC interface. That results in decrease of contact parameter scattering (for both ideality factor and effective barrier height). At higher annealing temperatures (350–450°C) the scatter increases again, probably due to local chemical interaction between nickel and silicon carbide.