

Вольт-амперные характеристики изотипных переходов SiC–SiC, изготовленных методом прямого твердофазного сращивания

© П.А. Иванов[¶], Л.С. Костина, А.С. Потапов, Т.П. Самсонова, Е.И. Белякова, Т.С. Аргунова, И.В. Грехов

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

(Получена 13 декабря 2006 г. Принята к печати 25 декабря 2006 г.)

Приведены результаты исследования вольт-амперных характеристик изотипных структур SiC–SiC, изготовленных прямым твердофазным сращиванием монокристаллических пластин 6H-SiC *n*-типа проводимости с концентрацией доноров $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Первоначальное соединение пластин осуществлялось в деионизованной воде. Для усиления сцепления проводился термический отжиг структуры при температуре 1250°C. Все особенности измеренных вольт-амперных характеристик непротиворечиво объясняются в рамках гипотезы о том, что граница SiC–SiC представляет собой переменный по толщине канал, заполненный собственным окислом SiO_x толщиной 10–100 нм. Минимальное измеренное дифференциальное сопротивление структуры ($6 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) ограничивается протеканием тока в слое окисла по механизму токов, ограниченных пространственным зарядом.

PACS: 68.35.Ct, 73.40.Lq, 73.40.Ty, 81.20.Vj

1. Введение

Твердофазное сращивание находит широкое применение в полупроводниковой технологии для изготовления структур и приборов различного функционального назначения [1]. С помощью твердофазного сращивания уже изготавливают структуры (карбид кремния)-на-изоляторе (SiCOI) и структуры QuaSiCTM [2–4]. В технологии монокристаллических SiC-приборов перспективным может оказаться прямое твердофазное сращивание (direct wafer bonding, DWB) монокристаллических пластин карбида кремния, например, для создания гетеропереходов на основе комбинаций различных политипов SiC. Достоинством метода DWB является то, что свойства соединяемых пластин SiC, такие как политипная модификация, тип проводимости и уровень легирования, в принципе могут быть совершенно произвольными.

По прямому сращиванию пластин SiC опубликованы пока лишь единичные работы. Авторам работы [5] в условиях сверхвысокого вакуума удалось срастить пластины 6H-SiC под давлением 20 МПа при температуре 800–1000°C. Было показано, что разница в кристаллографической ориентации соединяемых поверхностей не оказывает существенного влияния на сам процесс сращивания, однако разориентация существенно влияет на электрические свойства DWB-интерфейса. В нашей работе [6] сообщалось о сращивании пластин SiC путем их первоначального соединения в деионизованной воде и последующих термообработок. С помощью рентгеновской дифракционной топографии было показано, что доля сросшейся площади может достигать нескольких десятков процентов от общей площади структуры. В настоящей работе приводятся результаты исследований вольт-амперных характеристик

изотипных структур SiC–SiC, изготовленных данным способом.

2. Приготовление образцов

Для экспериментов использовалась пластина 6H-SiC (0001) *n*-типа проводимости, легированная азотом с концентрацией $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Из пластины были вырезаны два прямоугольных куска размером $\sim (1 \times 2) \text{ см}$. Слабые повреждения, загрязнения и шероховатость поверхности вырезанных пластинок устранялись механической полировкой алмазными пластинами, химической очисткой и термическим окислением с последующим удалением окисла. Дальнейшая подготовка к соединению включала в себя химическую очистку и гидрофилизацию поверхности. Приведение пластин в контакт осуществлялось в деионизованной воде с удельным сопротивлением 18 МОм·см. Пластины соединялись полярными Si- и C-поверхностями с соблюдением одинаковой азимутальной ориентации. Далее пара подвергалась сушке в центрифуге с последующей выдержкой при температуре 95–100°C в течение 4 ч на воздухе под нагрузкой 0.5 кГ/см². После этого осуществлялась высокотемпературная обработка образцов при 1250°C в течение 2 ч на воздухе.

Для измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) перехода SiC–SiC на поверхности пластин были сформированы омические контакты: сначала обе стороны структуры были отшлифованы алмазной пастой, затем на одной стороне напылением были сформированы круглые никелевые площадки диаметром 420 мкм, а на другой — сплошной никелевый контакт (рис. 1). Затем был проведен термический отжиг контактов в вакууме при температуре 950°C в течение 10 мин. Наконец, из структуры был выколот образец размером 3 × 5 мм, который использовался для измерений ВАХ.

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

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Вольт-амперные характеристики измерялись на постоянном и импульсном токе в диапазоне 1 мкА–1 А при разных температурах.

Заранее ожидалось, что присутствие DWB-интерфейса приведет к нелинейности ВАХ структуры SiC–SiC. В то же время свой вклад в нелинейность ВАХ может давать металлический контакт, если он имеет неомическую характеристику. С целью контроля характеристик Ni-контактов специально были измерены ВАХ между контактами, расположенными с одной стороны образца (контакты 1 и 2 на рис. 1). Измеренные ВАХ были омическими в широком диапазоне токов. Величина контактного сопротивления составляла 10^{-1} Ом·см², что вполне характерно для *n*-6H-SiC с концентрацией доноров $\sim 10^{16}$ см⁻³ [7].

Вольт-амперные характеристики перехода SiC–SiC (при измерении между контактами 1 и 3) показаны на рис. 2 в двойном логарифмическом масштабе. Каждая ВАХ начинается с линейного участка, который сменя-

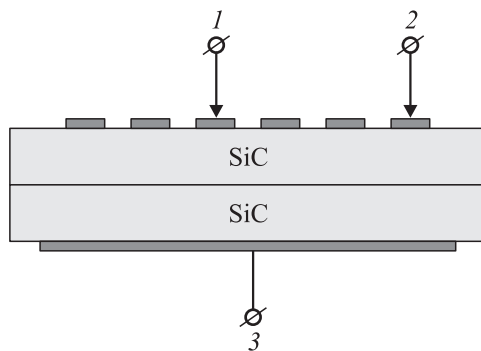


Рис. 1. Поперечное сечение структуры SiC–SiC с омическими контактами 1, 2, 3.

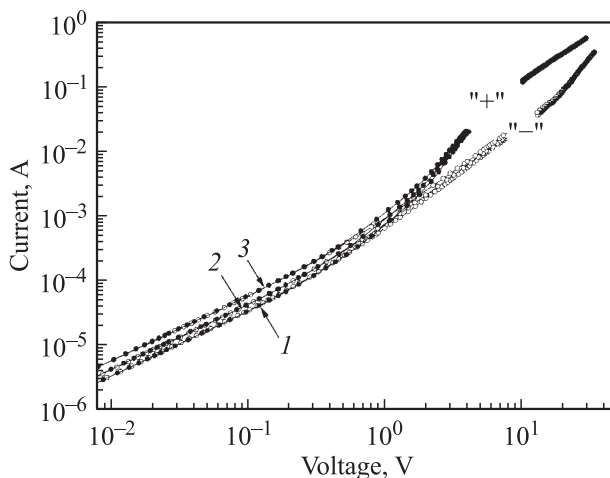


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры SiC–SiC. Полярность напряжения указана по отношению к пластине 6H-SiC со срачиваемой поверхностью (0001)C. $T = 290$ (1), 323 (2), 373 К (3).

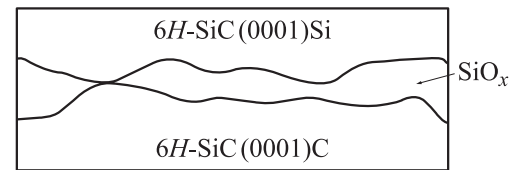


Рис. 3. Структура границы раздела SiC–SiC.

ется далее участком суперлинейной зависимости тока от напряжения. На линейном участке измеренные ВАХ абсолютно симметричны по отношению к полярности приложенного напряжения. Характерно, что ток растет при повышении температуры T (при нагреве до 100°C приблизительно в 1.7 раза). На суперлинейном участке ВАХ несимметричны по отношению к полярности приложенного напряжения (при напряжении 10 В разница в токе достигает 6 раз). Кроме того, температурная зависимость тока на суперлинейном участке постепенно вырождается по мере увеличения напряжения.

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены неоднородностью свойств DWB-интерфейса. Мы полагаем, что вследствие недостаточно гладкой поверхности соединяемых пластин граница срачивания представляет собой переменный по толщине наноразмерный канал, заполненный диэлектриком состава SiO_x (рис. 3). В то же время на границе есть отдельные точки, где нанощероховатые поверхности образуют „тесный“ контакт друг с другом.

Такое предположение можно обосновать тем, что после соединения пластин в воде (с предварительной гидрофильной обработкой поверхности) между ними может оставаться очень тонкая водяная прослойка, а это приводит, в свою очередь, к образованию собственного оксида SiO_x при последующем высокотемпературном отжиге. Таким образом, в местах „тесного“ соприкосновения нанощероховатых поверхностей образуется точечный контакт SiC–SiC без промежуточного слоя, а в остальной части граница раздела представляет собой структуру полупроводник–диэлектрик–полупроводник (ПДП) с переменной по толщине диэлектрической прослойкой. Описанная структура DWB-интерфейса позволяет объяснить особенности измеренных ВАХ следующим образом.

1. При небольших напряжениях ток протекает через очень малые по размеру области, в которых образован точечный контакт SiC–SiC (см. рис. 3). ВАХ такого контакта определяется термоэлектронной эмиссией через потенциальный барьер (см. зонную диаграмму на рис. 4):

$$I = S^* A T^2 \exp\left(-\frac{q\psi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_1}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где A — постоянная Ричардсона, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, q — элементарный заряд, ψ_B — высота барьера, S^* — эффективная площадь, через которую протекает ток I .

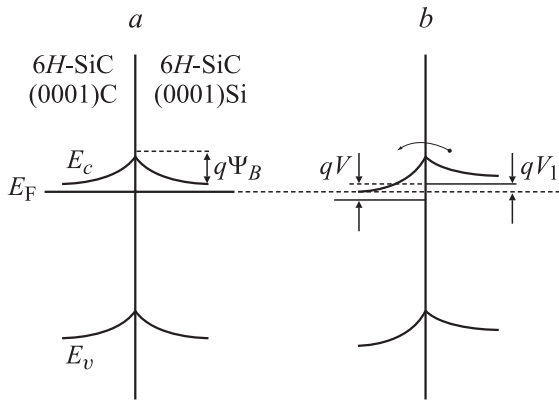


Рис. 4. Зонная диаграмма тесного контакта SiC-SiC в равновесии (a) и при протекании тока (b). E_c, E_v — края зоны проводимости и валентной зоны, E_F — уровень Ферми.

При напряжениях $V_1 \approx V/2 < kT$ формула (1) преобразуется в линейную зависимость тока I от напряжения V :

$$I = S^* A T^2 \exp\left(-\frac{q\psi_B}{kT}\right) \frac{qV}{2kT}. \quad (2)$$

Действительно, на начальном участке экспериментальные ВАХ линейны. Представляется интересным оценить высоту барьера ψ_B и эффективную площадь S^* . Высоту барьера можно определить, используя температурную зависимость тока, измеренного при некотором фиксированном напряжении V :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{T_2}{T_1} \exp\left[-\frac{q\psi_B}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right], \quad (3)$$

где I_1, I_2 — значения тока при температурах T_1 и T_2 соответственно. Если определена высота барьера ψ_B , то формула (2) позволяет оценить площадь S^* . Соответствующие расчеты дали высоту барьера $\psi_B \approx 30$ мэВ и площадь $S^* \approx 10^{-12}$ см². Отметим прежде всего, что поперечный размер области протекания тока составляет по порядку величины всего лишь 10 нм. Это подтверждает предположение о том, что области тесного контакта представляют собой отдельные точки. Небольшая величина высоты барьера понятна: в изотипном точечном контакте на нее могла бы повлиять лишь очень высокая плотность интерфейсных ловушек, $N_{it} \gg 1/S^* = 10^{12}$ см⁻².

2. При напряжениях выше нескольких десятых долей вольта ВАХ становится суперлинейной. Мы полагаем, что на этом участке ток протекает уже по всей площади структуры и является током, ограниченным пространственным зарядом (ТОПЗ) в диэлектрической прослойке. Анализ ТОПЗ в данном случае довольно затруднен по той причине, что приложенное к структуре напряжение V сложным образом делится между двумя полупроводниками и диэлектриком (см. зонную диаграмму на рис. 5).

Ситуация усугубляется тем, что плотность электронных состояний на противоположных границах раздела

SiO_x с SiC может быть различной. Именно это обстоятельство может быть причиной асимметрии ВАХ по отношению к полярности приложенного напряжения.

3. При увеличении внешнего напряжения выше некоторой величины V_{FB} , соответствующей плоским зонам в полупроводнике 1 ($V_1 \rightarrow \psi_B$, см. рис. 5, b), дальнейшее его приращение падает на области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике 2 (V_2) и на диэлектрической прослойке (V_d):

$$V \approx V_2 + V_d + \psi_B. \quad (4)$$

ВАХ на этом участке можно описать квадратичным законом для безловушечного ТОПЗ [8]:

$$j = \frac{\mu_d \epsilon_d V_d^2}{d^3}, \quad (5)$$

где j — плотность тока, μ_d — подвижность электронов в слое диэлектрика, ϵ_d — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, d — толщина диэлектрической прослойки. Внешнее напряжение V делится между слоем диэлектрика и областью пространственного заряда в полупроводнике 2 в такой пропорции, что

$$V_d \approx \frac{d}{W(V)} (V - V_{FB}), \quad W \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s (V - V_{FB})}{qN}}, \quad (6)$$

где W — толщина ОПЗ в полупроводнике 2, N — концентрация легирующей примеси (доноров) в полупроводнике, ϵ_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника. Подстановка (6) в (5) приводит к следующей зависимости плотности тока j от напряжения V :

$$j = \frac{qN\mu_d}{d} \frac{\epsilon_d}{2\epsilon_s} (V - V_{FB}). \quad (7)$$

Действительно, при больших напряжениях приращение тока становится пропорциональным приращению напряжения: $\Delta j \propto \Delta V$ (рис. 6).

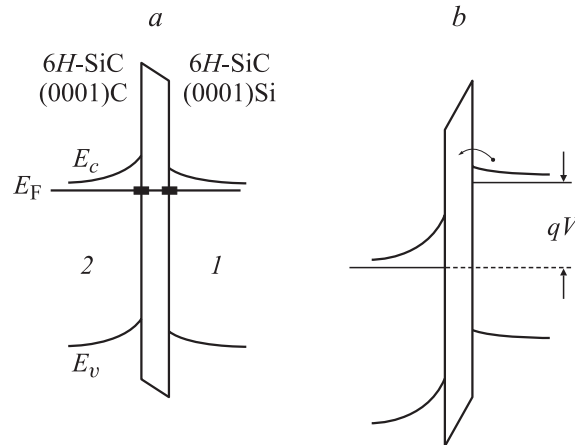


Рис. 5. Зонная диаграмма ПДП-контакта SiC-SiC в равновесии (a) и при протекании тока (b). E_c, E_v — края зоны проводимости и валентной зоны, E_F — уровень Ферми.

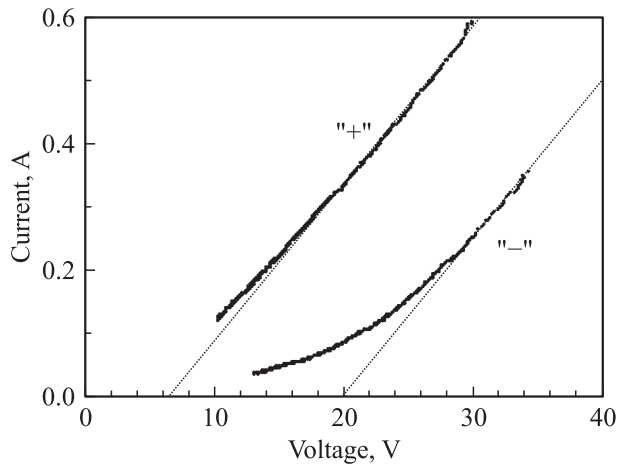


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики структуры SiC–SiC в линейном масштабе. Полярность напряжения указана по отношению к пластине 6H-SiC со сращиваемой поверхностью (0001)C. Температура измерения $T = 290$ К.

Отметим, что напряжение V_{FB} , определяемое экстраполяцией линейной части ВАХ на ось абсцисс, зависит от полярности приложенного напряжения. По-видимому, это связано, как уже было сказано выше, с разной плотностью состояний на полярных гранях термически окисленного 6H-SiC [9,10]. Однако дифференциальное сопротивление структуры на линейном участке ВАХ от полярности напряжения уже не зависит и составляет $R_d = 6 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Из формулы (6) интересно оценить толщину диэлектрической прослойки. Если предположить, что подвижность электронов в диэлектрическом слое SiO_x находится в пределах $0.001\text{--}0.01 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, то рассчитанная по формуле (6) толщина прослойки по порядку величины составляет $10\text{--}100$ нм. Такие толщины окисла не противоречат предположению о том, что именно ТОПЗ ограничивает проводимость интерфейса SiC–SiC. Наконец отметим, что ТОПЗ, описываемый формулой (6), должен слабо зависеть от температуры, что тоже подтверждается экспериментально.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ РАН (грант № 05-02-17768).

Список литературы

- [1] Q.-Y. Tong, U. Gösele. *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology* (J. Wiley&Sons, Inc., 1999).
- [2] F. Letertre, E. Jalaguier, L. Di Cioccio, F. Templier, J.M. Bluet, C. Banc, I. Matko, B. Chenevier, E. Bano, G. Guillot, T. Billon, B. Aspar, R. Madar, B. Ghyselen. *Mater. Sci. Forum*, **389–393**, 151 (2002).
- [3] F. Letertre, J. Brault, I. Matko, F. Enjalbert, E. Bellet-Amalric, G. Feuillet, C. Richtarch, B. Faure, L. DiCioccio, R. Madar, B. Daudin, E. Monroy. *Physica Status Solidi C*, **0**, 2103 (2003).

- [4] F. Letertre, N. Daval, F. Templier, E. Bano, D. Planson, L. DiCioccio, E. Jalaguier, J.M. Bluet, T. Billon, R. Madar, J.P. Chante. *Mater. Sci. Forum*, **433–436**, 813 (2003).
- [5] G.N. Yushin, A.G. Kvit, R. Gollazo, Z. Sitar. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **742**, K-2.5 (2003).
- [6] И.В. Грехов, Л.С. Костина, Т.С. Аргунова, Е.И. Белякова, Л.Н. Же, П.А. Иванов, Т.П. Самсонова. *Письма ЖТФ*, **32** (10), 76 (2006).
- [7] М.М. Anikin, P.A. Ivanov, A.A. Lebedev, S.N. Pytko, A.M. Strel'chuk, A.L. Syrkin. In: *Semiconductor Interfaces and Microstructures*, ed. by Z.C. Feng (World Scientific, Singapore, 1992) p. 280.
- [8] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [9] П.А. Иванов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, А.В. Суворов, В.Е. Челноков. *ФТП*, **27**, 1146 (1993).
- [10] П.А. Иванов, А.О. Константинов, В.Н. Пантелеев, Т.П. Самсонова, В.Е. Челноков. *ФТП*, **28**, 1172 (1994).

Редактор Л.В. Шаронова

Current–voltage characteristics of isotype SiC–SiC structures made by direct wafer bonding

P.A. Ivanov, L.S. Kostina, A.S. Potapov,
T.P. Samsonova, E.I. Belyakova, T.S. Argunova,
I.V. Grekhov

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

Abstract Current–voltage characteristics of isotype SiC–SiC structures made by direct wafer bonding of monocrystalline n -type 6H-SiC plates with donor concentration of 10^{16} cm^{-3} are reported. The platelets were brought into the contact being immersed into the deionised water. Subsequent thermal annealing was performed to strengthen adhesion. SiC–SiC interface is supposed to be a nanoscale channel which is filled out with thermal SiO_x oxide (of $10\text{--}100$ nm thick). The minimum differential resistance of the structure $6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ is determined by current in the dielectric layer in accordance with the space-charge limited mechanism.