

©1994 г.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ β -SiC/Si

А.С.Зубрилов¹

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 21 марта 1994 г. Принята к печати 28 марта 1994 г.)

Исследовались электрические свойства гетеропереходов n - β -SiC/ p -Si, полученных газофазной эпитаксией (CVD-методом) на подложках Si(111) в системе SiH_4 - C_2HCl_3 - H_2 при 1100°C . Полученные гетеропереходы характеризуются хорошими выпрямительными свойствами и высоким быстродействием. Прямая вольт-амперная характеристика может быть представлена в виде $I \propto \exp(-qU/nkT) \exp(qV/nkT)$, где $U = (0.87 \pm 0.02) \text{ эВ}$ — контактная разность потенциалов, $n = 1.1$ – 1.2 — коэффициент идеальности. Установлено, что доминирующий механизм прямого тока связан с процессом рекомбинации носителей заряда через уровни ловушек с плотностью состояний $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$, расположенные на гетерогранице и смещенные относительно середины запрещенной зоны.

Существенные успехи, достигнутые за последнее время в технологии эпитаксиального роста кубического карбида кремния на кремниевых подложках [1–4], делают перспективной эту систему для создания приборов с гетеропереходом: фотодиодов, солнечных элементов [5], а также выпрямительных диодов и биполярных транзисторов с широкозонным эмиттером [6]. Основной причиной, существенно снижающей параметры этих приборов относительно их расчетных значений, является высокая плотность электрически активных дефектов, расположенных на гетерогранице и связанных с рассогласованием постоянных кристаллической решетки (20%) и значительной разницей (8%) в коэффициентах термического расширения β -SiC и Si. Однако природа и свойства этих дефектов до настоящего времени не изучены.

В данной работе исследовался перенос носителей в гетеропереходах n - β -SiC/ p -Si, полученных эпитаксией в новой газовой системе SiH_4 - C_2HCl_3 - H_2 при повышенной температуре (1100°C).

¹ Работа частично выполнена в CREE Research EED Inc., 194021 St. Petersburg, Russia.

1. Эпитаксиальные структуры

Эпитаксиальный рост пленок $3C-SiC$, толщиной 0.5–10 мкм проводился при атмосферном давлении из газовой фазы CVD-методом без буферного слоя на легированные бором (8 Ом·см) подложки $p-Si(111)$ диаметром 75 мм. В качестве источника Si и C использовалась газовая композиция $SiH_4-C_2HCl_3$ с газом-носителем H_2 . Эпитаксиальные пленки $3C-SiC$ специально не легировались. Пониженные температуры роста ($\cong 1100^\circ C$) позволили использовать стандартное оборудование, предназначенное для газотранспортной эпитаксии кремния. Подробности данной технологии выращивания пленок $3C-SiC$ на кремнии и их свойства приведены в [7,8].

В экспериментах использовались специально отобранные эпитаксиальные слои $3C-SiC$ с монокристаллической структурой и зеркальной поверхностью, близкие по толщине ($\cong 2$ мкм) и удельному сопротивлению ($\cong 0.04-0.06$ Ом·см) и однородные по площади.

Контроль качества пленок осуществлялся методами ИК отражения в области остаточных лучей по методике [9] и рентгеновской дифракции. Толщина пленок измерялась механическим профилометром и интерферометрически, а их удельное сопротивление — 4-зондовым методом.

Образцы представляли собой меза-структуры площадью 0.17–5 мм², изготовленные методом реактивного ионного травления при использовании термически напыленного Al в качестве маскирующего покрытия. После травления меза-диоды выдерживали обратное напряжение 30–40 В при токе утечки не более 1 мА/см² и имели коэффициент выпрямления не менее 10^5 при смещении 0.5 В.

На изготовленных таким образом эпитаксиальных структурах измерялись вольт-амперные ($I-V$) и вольт-фарадные ($C-V$) характеристики. Длина диффузии неравновесных носителей заряда в p -базе вблизи интерфейса контролировалась методом измерения фототока короткого замыкания [10] [по отсечке зависимости фототок — ширина области пространственного заряда (ОПЗ)] при освещении образца вольфрамовой лампой через водяной фильтр, а релаксационное время жизни неравновесных носителей заряда в базе — методом Лэкса [11]. Глубокие уровни в запрещенной зоне исследовались методом релаксации емкости (DLTS) при изменении температуры в диапазоне 77–500 К.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены типичные $C-V$ -характеристики для гетероструктуры $3C-SiC/Si$ на частотах 1 и 1000 кГц. Из рис. 1 видно, что: 1) $p-n$ -переход резкий; 2) ОПЗ почти целиком расположена в подложке, поскольку наклон характеристики соответствует заранее известной степени легирования подложки Si (концентрация бора составляет $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³); 3) перераспределения бора в подложке после эпитаксии на глубинах, превышающих по крайней мере 0.65 мкм от гетерограницы, не происходит; 4) напряжение отсечки U^* составляет 0.5 В и не зависит от частоты.

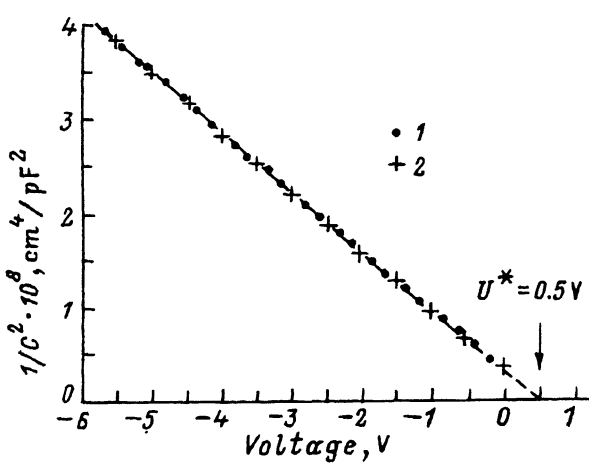


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики гетероперехода 3C-SiC/Si. Температура — 300 К. Частота, кГц: 1 — 1000, 2 — 1.

Для анализа показанных на рис. 1 экспериментальных данных рассмотрим энергетическую зонную диаграмму гетероперехода n -3C-SiC/ p -Si, представленную на рис. 2. На диаграмме использованы следующие обозначения. Разрыв зоны проводимости и валентной зоны на гетерогранице $\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 = 0.05$ эВ, $\Delta E_v = E_1 - E_2 - \Delta E_c = 1.03$ эВ соответственно (здесь и далее индекс 1 используется для SiC, индекс 2 — для Si); $\chi_1 = 4.0$ эВ [12] и $\chi_2 = 4.05$ эВ — электронные сродства; $E_1 = 2.2$ эВ [13] и $E_2 = 1.12$ эВ — ширины запрещенной зоны. Контактная разность потенциалов $qU = (\chi_2 + E_2 - \delta_2) - (\chi_1 + \delta_1) = (0.87 \pm 0.02)$ эВ [$\delta_1 = (0.08 \pm 0.02)$ эВ, $\delta_2 = 0.23$ эВ — глубины залегания уровня Ферми относительно ближайшей зоны]. Небольшая неопределенность в значении δ_1 связана с разбросом в энергии ионизации доноров (14–21 мэВ [14]) и в степени компенсации для пленок 3C-SiC/Si (типичные значения 0.8–0.95).

Из сравнения с рис. 2 видно существенное расхождение рассчитанного значения контактной разности потенциалов (0.87 В) с напряжением отсечки на C - V -характеристике (0.50 В), что обычно свидетельствует о влиянии на барьерную емкость встроенных зарядов. Естественно предположить, что ими являются электронные ловушки, возникающие на гетерогранице или вблизи нее из-за большого числа обо-

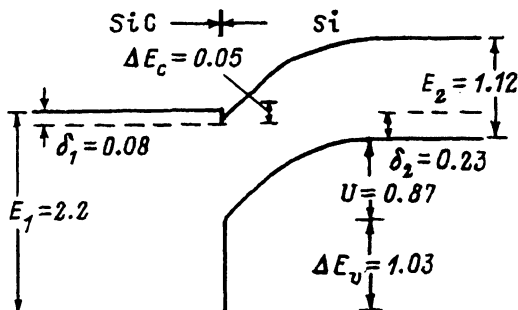


Рис. 2. Равновесная зонная диаграмма гетероперехода 3C-SiC/Si.

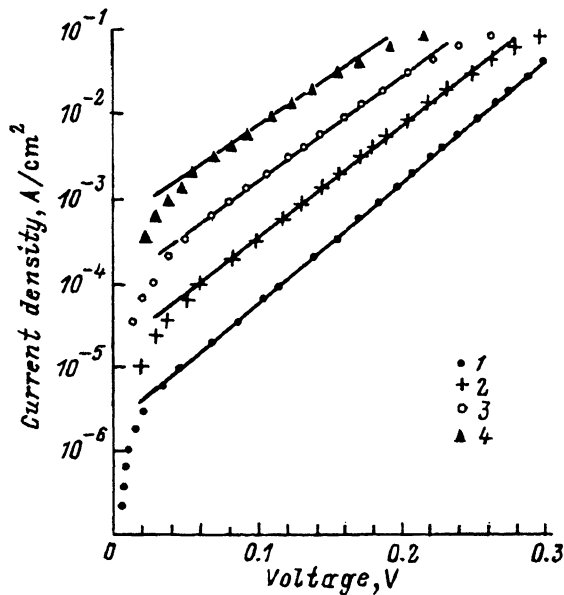


Рис. 3. Прямые вольт-амперные характеристики гетероперехода 3C-SiC/Si при различных температурах, °C: 1 — 21, 2 — 40, 3 — 63, 4 — 90.

рванных связей вследствие 20% расхождения постоянных решетки a_1 и a_2 для 3C-SiC и Si соответственно. Оценка плотности оборванных связей при эпитаксии на плоскости (111) подтверждает сделанное выше предположение: $N_{(111)} = (4/\sqrt{3})(a_1^{-2} - a_2^{-2}) \cong 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, где $a_1 = 0.436 \text{ нм}$ [15], $a_2 = 0.543 \text{ нм}$. Отсутствие зависимости барьерной емкости от частоты по крайней мере до 1000 кГц свидетельствует о том, что времена релаксации состояний на границе раздела много меньше 1 мкс при 300 К.

На рис. 3 представлены типичные прямые I - V -характеристики гетероструктуры 3C-SiC/Si при различных температурах в диапазоне 21–90°C. Анализ их наклонов показывает, что I - V -характеристики могут быть описаны следующим выражением:

$$I = B \exp(-E^*/kT) \exp(qV/nkT), \quad (1)$$

где $n = 1.1$ – 1.2 — так называемый коэффициент идеальности; $E^* = 0.68 \text{ эВ}$ — энергия активации прямого тока; B — константа, независящая от T .

Сравним описанные выше результаты с экспериментальными данными, полученными в работе [16]. В последней электрический транспорт в гетеропереходах n -3C-SiC/ p -Si, выращенных аналогичным методом на подложках Si(100), характеризуется следующими значениями параметров: коэффициент идеальности I - V -характеристики $n = 1.3$, энергия активации прямого тока $E^* = 0.58 \text{ эВ}$, напряжение отсечки при C - V -измерениях $U^* = 0.58 \text{ В}$, что неплохо согласуется с данными настоящей работы. Отличие заключается в отсутствии в нашем случае туннельных токов, которые в работе [16] наблюдались при прямых смещениях менее 0.2 В. На основе того, что значение коэффициента n близко к единице, а значения E^* и qU^* равны, в работе [16] делается вывод об инжекционной природе прямых токов при смещениях более

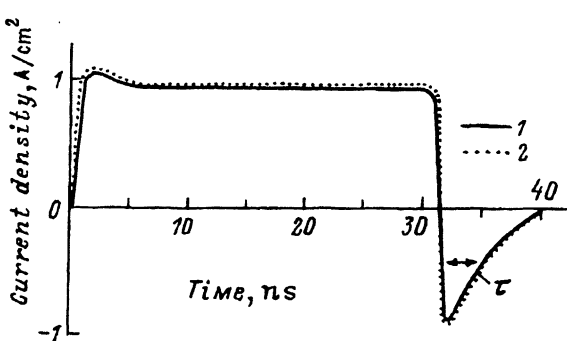


Рис. 4. Процесс обратного восстановления гетероперехода 3C-SiC/Si при различных температурах, °C: 1 — 20, 2 — 100.

0.2 В, что, на наш взгляд, представляется не вполне убедительным и требует дополнительных подтверждений.

Для определения типа основного механизма прямого тока в гетеропереходах 3C-SiC/Si был исследован процесс их обратного восстановления при переключении с прямого напряжения на обратное, показанный на рис. 4. Время обратного восстановления гетеропереходов τ с площадью 0.3 мм^2 , как видно из рис. 4, составляет всего 3 нс и определяется постоянной времени перезарядки барьерной емкости гетероперехода ($\cong 60 \text{ пф}$) через внешнее сопротивление нагрузки (50 Ом). С другой стороны, длина диффузии неосновных носителей заряда вблизи краев ОПЗ ($L_p + L_n$), измеренная по фототоку короткого замыкания, в наших структурах довольно велика и составляет около 20 мкм (рис. 5). Соответствующее этой длине время жизни неосновных носителей заряда составляет не менее 100 нс, что должно существенно затягивать время обратного восстановления диода после инжекции и накопления носителей заряда в базе. Поскольку на практике этого не наблюдается даже при повышенных температурах (рис. 4), можно сделать вывод о том, что не происходит сколько-нибудь заметной инжекции носителей заряда гетеропереходом с последующей их диффузией и рекомбинацией в квазинейтральных областях. Следовательно, доминирующий

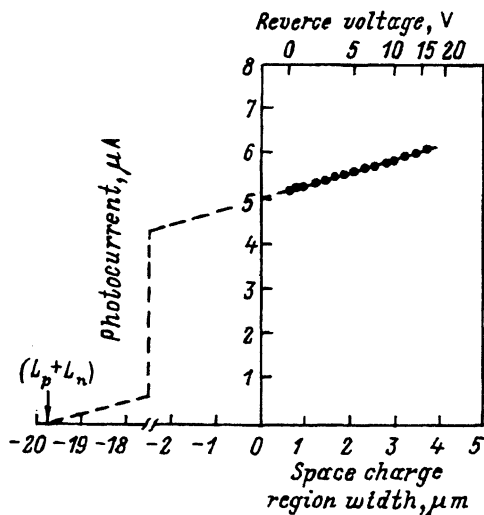


Рис. 5. Зависимость фототока короткого замыкания от ширины ОПЗ для гетероперехода 3C-SiC/Si. Температура — 300 К.

механизм прямого тока не диффузионный, несмотря на то что коэффициент идеальности $I-V$ -характеристики n близок к единице. Подобная ситуация хорошо известна в кремниевых гомопереходах для генерационно-рекомбинационных токов в ОПЗ при рекомбинации носителей заряда через ловушки, смещенные относительно середины запрещенной зоны более чем на $10kT$, и описана в модели Саа-Нойса-Шокли [17]. Аналогичная модель для гетеропереходов была предложена Долегой [18]. В последней аналитическая запись для $I-V$ -характеристики гетероперехода совпадает с полученным из эксперимента выражением (1), где $E^* = qU/n$. Легко видеть, что определенные выше значения энергии активации прямого тока E^* , контактной разности потенциалов U и коэффициента n находятся в хорошем соответствии с моделью [18].

Таким образом, наиболее вероятная природа прямых токов, наблюдаемых в гетеропереходах $3C-SiC/Si$, — рекомбинация носителей заряда в ОПЗ через уровни ловушек, смещенные более чем на $10kT$ относительно середины запрещенной зоны, что приводит к уменьшению наклона $I-V$ -характеристик до значений близких к единице. Этот вывод согласуется с полученным выше результатом о влиянии электронных ловушек, расположенных на гетерогранице, на барьерную емкость. Поскольку мы имеем дело с $n^+ - p$ -переходом, барьерная емкость которого больше расчетной (соответственно, ширина ОПЗ — меньше расчетной), суммарный внесенный состояниями на оборванных связях заряд — отрицательный. Следовательно, эти состояния лежат в запрещенной зоне ниже уровня Ферми. Это не противоречит имеющимся представлениям об образовании на гетерогранице донорного состояния в нижней половине запрещенной зоны в случае неспаренного электрона на оборванной связи и акцепторного состояния в верхней половине запрещенной зоны — в случае «болтающейся» пары [19]. Поверхностную плотность ловушек N можно оценить из разницы между полученными значениями U и U^* , используя модель Донелли-Милнса [20]:

$$N = q^{-0.5} [2\varepsilon_0(\varepsilon_1 N_1 + \varepsilon_2 N_2)(U - U^*)]^{0.5}, \quad (2)$$

где $N_1 = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_2 = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — концентрации некомпенсированных доноров и акцепторов соответственно, $\varepsilon_1 = 9.72$ [21] и $\varepsilon_2 = 11.9$ — относительные диэлектрические проницаемости для $3C-SiC$ и Si соответственно, $\varepsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$. Полученное из выражения (2) значение $N \cong 2.9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ невелико [19] и, следовательно, ловушки не окажут существенного влияния на зонную диаграмму на рис. 2 (произойдет небольшое уменьшение ширины ОПЗ с сохранением соответствующих энергетических параметров). Оценка плотности состояний на гетерогранице $n-3C-SiC/p-Si(100)$, сделанная с использованием данных работы [16], показала, что вопреки ожидаемому увеличению N по сравнению со случаем гетероперехода $3C-SiC/Si(111)$ (поверхностная плотность оборванных связей при этом, очевидно, должна возрастать в $\sqrt{3}$ раз) происходит некоторое ее снижение ($N \cong 1.3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). По-видимому, это вызвано технологическими различиями и свидетельствует в пользу перспективности дальнейшего поиска оптимального способа получения гетеропереходов SiC/Si и в первую очередь в так называемой «буферной» технологии [1].

Попытка обнаружить глубокие центры в ОПЗ гетеропереходов методом релаксационной емкостной спектроскопии дала отрицательный результат, несмотря на достаточную относительную чувствительность установки $\sim 10^{-4}$ (минимально фиксируемая концентрация глубоких центров в нашем случае — 10^{11} см^{-3}). Это, по-видимому, объясняется тем, что с одной стороны, ловушки сосредоточены вблизи гетерограницы в местах концентрации висячих связей, т.е. довольно далеко от края ОПЗ, и поэтому не могут быть перезаряжены при изменении приложенного напряжения от обратного до нулевого. С другой стороны, их сложно перезарядить при инжекции неосновными носителями, поскольку, как показано выше, эти ловушки являются эффективными рекомбинационными центрами, т.е. интенсивно обмениваются носителями заряда с обеими зонами и не удерживают на себе заряда неосновных носителей.

Заключение

Таким образом, механизмом токопереноса через гетеропереход 3C-SiC/Si в прямом направлении является рекомбинация носителей заряда вблизи гетерограницы через глубокие центры, смещенные относительно середины запрещенной зоны, с концентрацией $\cong 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ см}^{-2}$, что обеспечивает доминирование этого механизма в прямых токах по крайней мере до 0.1 А/см^2 . Полученные гетеропереходы обладают экспоненциальной I - V -характеристикой с наклоном близким к единице и термической активационной энергией 0.68 эВ , а также хорошими выпрямительными (коэффициент выпрямления не хуже 10^5 при 0.5 В) и частотными (отсутствует накопление заряда неосновных носителей в базе) свойствами. Кроме того, из-за высокой скорости рекомбинации носителей заряда на гетерогранице прямое падение напряжения на гетеропереходе 3C-SiC/Si невелико (рис. 3). Все это делает систему 3C-SiC/Si наряду с известными применениями перспективной и для создания быстро восстанавливающихся выпрямительных диодов.

Автор признателен В.А. Дмитриеву за предоставленные пленки 3C-SiC , Н.А. Кузнецову — за DLTS-измерения, а также В.Е. Челнокову, В.Б. Шуман, А.М. Шуман, А.М. Стрельчуку и П.А. Иванову — за дискуссию и полезное обсуждение.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] H. Matsunami. Springer Proc. in Physics, **71**, 3 (1992).
- [2] S. Nishino, J.A. Powell, H.A. Will. Appl. Phys. Lett., **42**, 460 (1983).
- [3] S. Nishino, H. Suhara, H. Ono, H. Matsunami. J. Appl. Phys., **61**, 4889 (1987).
- [4] K. Takahashi, S. Nishino, J. Saraie, K. Harada. Springer Proc. in Physics, **71**, 78 (1992).
- [5] A. Solangi, M.I. Chandhry. Springer Proc. in Physics, **71**, 362 (1992).
- [6] T. Sugii, T. Ito, Y. Furumura, M. Doki, F. Mieno, M. Maeda. IEEE Electron. Dev. Lett., **9**, 87 (1988).
- [7] I.M. Baranov, V.A. Dmitriev, I.P. Nikitina, T.S. Kondrateva. Springer Proc. in Physics, **71**, 116 (1992).
- [8] И.М. Баранов, В.А. Дмитриев, И.П. Никитина, В.Е. Челноков. Тезисы VII Межд. конф. по микроэлектронике (Минск, 1990) т. 1, с. 83.
- [9] R.T. Holm, P.H. Klein, P.E.R. Nordquist, Jr. J. Appl. Phys., **60**, 1479 (1986).

- [10] M.M. Anikin, A.A. Lebedev, S.N. Pyatko, V.A. Soloviev, A.M. Strelchuk. Springer Proc. in Physics, **56**, 269 (1992).
- [11] B. Lax, S.F. Neustadter. J. Appl. Phys., **25**, 1148 (1954).
- [12] J. Peltier, D. Gervais, C. Promot. J. Appl. Phys., **55**, 994 (1984).
- [13] R.J. Delven. Phys. Chem. Sol., **13**, 163 (1960).
- [14] T. Tachibana, H.S. Kong, Y.C. Wang, R.F. Davis. J. Appl. Phys., **67**, 6375 (1990).
- [15] G.A. Slack, R.I. Scace. J. Chem. Phys., **42**, 805 (1965).
- [16] M.I. Chaudhry. IEEE Electron. Dev. Lett., **12**, 670 (1991).
- [17] C.T. Cah, R.N. Noyce, W. Shokley. Proc. IRE, **45**, 1228 (1957).
- [18] U. Dolega, Zs. Naturforsch., **18a**, 653 (1963).
- [19] A.G. Milnes, D.L. Feucht. *Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions* (N.Y., Academic Press, 1972).
- [20] J.P. Donnelly, A.G. Milnes. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-14**, 63 (1967).
- [21] L. Patrick, W.J. Choyke. Phys. Rev. B, **2**, 2255 (1970).
-

Редактор В.В. Чалдышев