

3C-SiC *p-n*-структуры, полученные методом сублимации на основе подложек 6H-SiC

© А.А. Лебедев, А.М. Стрельчук, Д.В. Давыдов, Н.С. Савкина, А.С. Трегубова,
А.Н. Кузнецов, В.А. Соловьев, Н.К. Полетаев

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

(Получена 3 сентября 2002 г. Принята к печати 6 сентября 2002 г.)

Методом сублимационной эпитаксии в вакууме на основе 6H-SiC выращены слои 3C-SiC *n*- и *p*-типа проводимости. На основе полученной эпитаксиальной *p-n*-структуры были сформированы диоды и проведены исследования их параметров методами вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, методом DLTS и электролюминесценции. Показано, что характеристики исследованных диодов близки к характеристикам диодов на основе объемного 3C-SiC. Сделан вывод о применимости метода сублимационной эпитаксии для получения 3C-SiC *p-n*-структур на основе подложек других поли типов карбида кремния.

1. Введение

Кубический карбид кремния представляет значительный интерес с точки зрения практического применения, так как имеет максимальную среди поли типов SiC подвижность носителей заряда, величина которой не зависит от кристаллического направления. Кроме того, включения 3C-SiC иногда образуются в эпитаксиальных слоях более широкозонных гексагональных поли типов SiC. В то же время получение приборов на основе 3C-SiC затруднено отсутствием подложек этого поли типа больших размеров. Поэтому рост и исследование свойств 3C-SiC представляется актуальной исследовательской задачей.

В предыдущей работе мы сообщали о получении методом сублимационной эпитаксии в вакууме (SEV) гетероструктур *n*-3C-SiC/*n*-6H-SiC с хорошим качеством слоя 3C-SiC [1]. Цель настоящей работы состояла в получении методом SEV *p-n*-структур 3C-SiC и исследовании их свойств.

2. Образцы

Известно, что изменение соотношения Si:C в зоне роста оказывает существенное влияние на гетерополи типную эпитаксию карбида кремния. Так, увеличение концентрации Si приводит к увеличению вероятности образования 3C-SiC. Рост слоев 3C-SiC на основе подложек 6H-SiC возможен также при сублимационной эпитаксии в избытке кремния [2,3].

Исследованные *p-n*-структуры были выращены методом сублимационной эпитаксии в вакууме на подложке Лэли 6H-SiC. Вначале на грани (0001)Si подложки был выращен эпитаксиальный слой *n*-типа проводимости. Анализ рентгеновских топограмм показал, что большая часть выращенного слоя представляет собой 3C-модификацию SiC. Площадь слоя *n*-3C-SiC составляла порядка 25 мм²; *p-n*-переход был получен выращиванием слоя *p*⁺-3C-SiC, легированного Al в процессе роста. Анализ рентгеновских топограмм образца с *p*-слоем пока-

зал, что слой *p*-3C-SiC образовался на всей поверхности эпитаксии и имел мелкодвойниковую структуру [4].

Омические контакты были получены магнетронным нанесением Al и Ti (к слою *p*-типа проводимости) и Ni (к слою *n*-типа) с последующим отжигом в вакууме при температурах 1100 и 900°C соответственно. Межа-структуры с площадями $3 \cdot 10^{-3}$, 10^{-4} , и $8 \cdot 10^{-5}$ см² были сформированы реактивным плазмо-ионным травлением с использованием маскирующего покрытия из Al.

3. Экспериментальные результаты

Для более детального исследования толщин эпитаксиальных слоев и их границ образец был разделен на две части, таким образом, чтобы скол прошел через ряд диодов с наибольшей площадью. Поперечные сколы диодов были исследованы методом тока, индуцированного электронным зондом (EBIC), и методом вторичных электронов (SE) в растровом электронном микроскопе (SEM) JSM-50A. Известно, что в областях с различной проводимостью наблюдается разный коэффициент выхода вторичных электронов, что приводит к появлению так называемого вольт-контраста при исследованиях в режиме вторичных электронов [5]. Величина скачка сигнала SE, положение середины перепада и его полуширина в определенной степени характеризуют величину встроенного электрического поля, положение его максимума и ширину области пространственного заряда соответственно. На рис. 1 представлены координатные зависимости сигналов SE и EBIC, полученные при сканировании поверхности скола исследовавшихся диодов. На кривой SE наблюдаются три области, имеющие скачки сигнала. Область с максимальным скачком SE соответствует *p-n*-переходу в 3C-SiC, который также хорошо проявляется в режиме EBIC. Оставшиеся две соответствуют изотипным переходам *n*-3C-SiC-*n*-6H-SiC и *n*-6H-SiC-(подложка *n*⁺-6H-SiC). Таким образом, на начальных стадиях эпитаксиального роста на подложке 6H-SiC происходит образование буферного *n*-6H-SiC слоя толщиной ~ 1.5 мкм. Затем происходит трансфор-

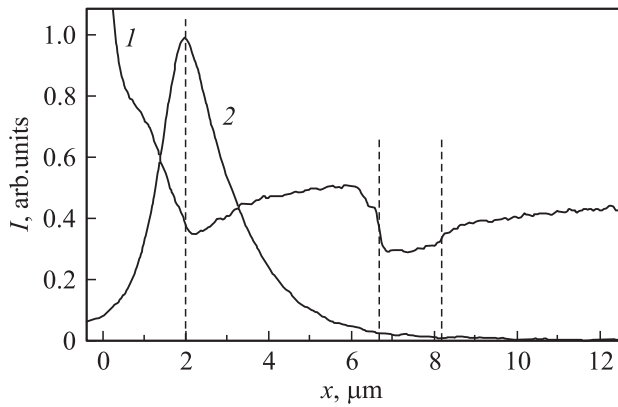


Рис. 1. Сигналы от вторичных электронов (1) и ЕВИК (2) для исследованных $p-n$ -структур.

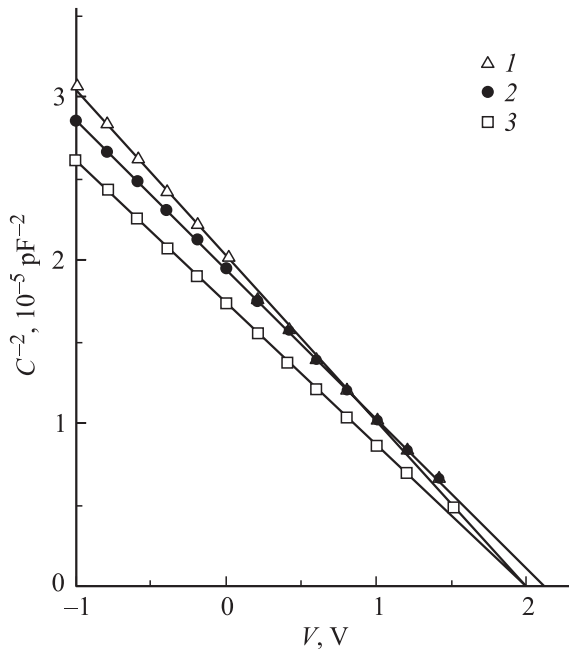


Рис. 2. Типичные вольт-фарядные характеристики исследованных $p-n$ -структур при комнатной температуре.

мация политипа и рост эпитаксиального слоя $n-3C-SiC$ (толщиной ~ 4.5 мкм). Значительный скачок сигнала вторичных электронов на границе изотипного гетероперехода $3C-6H-SiC$ говорит о существенном скачке потенциала на границе двух полупроводников.

Оценка диффузионной длины дырок в слое $n-3C-SiC$, проведенная на основе данных ЕВИК, дала значение ~ 1.5 мкм. Это говорит о том, что инжектированные из $p-3C-SiC$ дырки могут продиффундировать через слой $n-3C-SiC$ до границы с буферным слоем $6H-SiC$.

Вольт-фарядные характеристики ($C-V$) структур измерялись методом ртутного зонда на поверхности слоев n - и p -типа проводимости и затем — после формирования диодных меза-структур. Определенная из наклона $C-V$ -характеристик величина концентрации $N_d - N_a$ со-

ставляла $(1.7-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ в слое n -типа проводимости и $N_a - N_d \approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ на поверхности слоя p -типа. $C-V$ -характеристики диодов были линейны в координатах $C^{-2}-V$, что означало, что полученные $p-n$ -переходы резкие (рис. 2). Напряжение емкостной отсечки (V_c) составило 2.05 ± 0.05 В, что близко к значению E_g для $3C-SiC$ (2.39 эВ) и может быть обусловлено гомопереходом на основе $3C-SiC$.

При DLTS-исследовании был обнаружен центр с уровнем энергии $E_c - 0.63$ эВ, имеющий параметры, близкие к параметрам структурного дефекта в эпитаксиальных пленках $3C-SiC$, выращенных методами газовой фазной эпитаксии (CVD) [6,7] и SEV [1] (рис. 3). Это наблюдение подтверждает предположение, что базовая область исследованных структур — слой $3C-SiC$ n -типа проводимости.

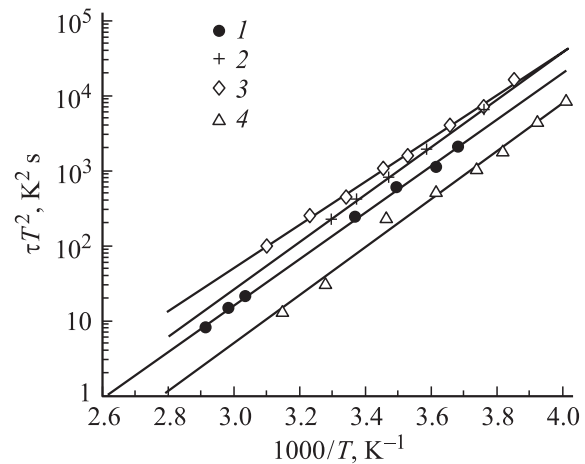


Рис. 3. Зависимости Аррениуса для центра с уровнем энергии $E_c - 0.63$ эВ из работ: 1 — [1], 2 — [6], 3 — [7], 4 — полученные в данной работе.

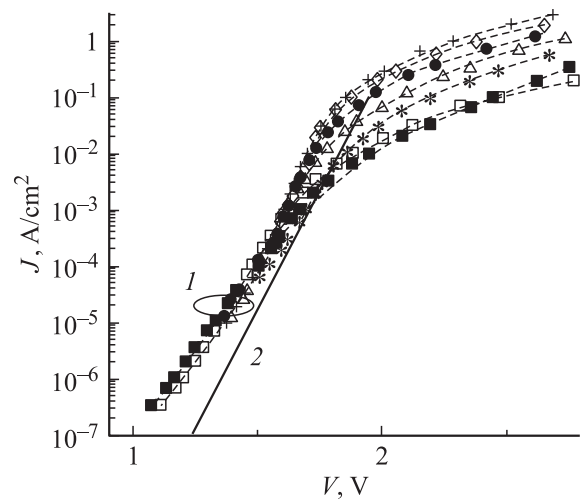


Рис. 4. Экспериментальные (кривые 1; разные значки соответствуют различным диодам) и теоретические (кривая 2; для $3C-SiC$ $p-n$ -гомоперехода [8]) вольт-амперные характеристики в области прямых токов при комнатной температуре.

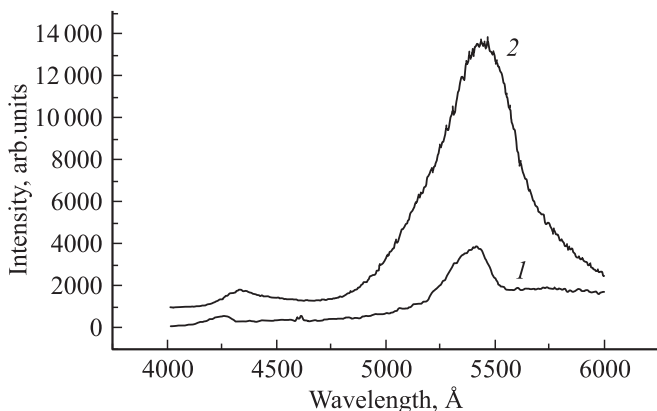


Рис. 5. Спектры электролюминесценции исследованных структур при токе $I = 70$ мА для температур T, K : 1 — 300, 2 — 600.

При исследовании вольт-амперных характеристик диодов ($I-V$) было показано, что при малых плотностях тока зависимость тока от напряжения экспоненциальна: $J = J_0 \exp(qV/nkT)$, $n = 2.5-2.6$ (рис. 4). $I-V$ -характеристики исследованных диодов были близки $I-V$ -характеристикам $p-n$ -гомоструктур на основе объемного 3C-SiC [8].

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) диодов представлены на рис. 5. В спектрах ЭЛ можно выделить полосы с максимумами при $h\nu_{\max} \approx 2.3$ эВ („зеленая“ полоса), $h\nu_{\max} \approx 2.9$ эВ („фиолетовая“ полоса); относительная и абсолютная интенсивности полос возрастают с увеличением плотности прямого тока J и температуры. Следует отметить особенности спектров: положение полос ЭЛ с максимумами при $h\nu_{\max} \approx 2.9$ эВ и $h\nu_{\max} \approx 2.3$ эВ, близкое ширинам запрещенных зон 6H-SiC и 3C-SiC; их незначительная полуширина (в частности, по сравнению с полушириной так называемой „зеленой“ полосы в 6H-SiC, обусловленной дефектами); характерное изменение интенсивности при увеличении тока и при нагреве. Эти наблюдения позволяют связать две полосы ЭЛ с аннигиляцией свободного экситона в 6H-и 3C-SiC.

Анализ полученных данных показывает, что характеристики данных структур соответствуют гомопереходам на основе 3C-SiC. Наблюдавшаяся в спектре ЭЛ полоса излучения, обусловленная рекомбинацией свободного экситона в 6H-SiC, связана с диффузией дырок из области $p^+-3C-SiC$ через слой 3C-SiC до границы с буферным слоем 6H-SiC. То, что данное излучение возникает не на металлургической границе $p-n$ -перехода, а в глубине базовой области, было хорошо различимо на торцевом сколе образца в оптическом микроскопе.

4. Заключение

Проведенные в настоящей работе исследования показывают, что методом сублимационной эпитаксии в вакууме возможно получение 3C-SiC $p-n$ -структур хорошего качества на основе подложек 6H-SiC.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 00-02-16688 и № 01-02-17657, а также гранта YEF 2001/2-186.

Список литературы

- [1] D.V. Davydov, A.A. Lebedev, A.S. Tregubova et. al. Mater. Sci. Forum, **338-342**, 221 (2000).
- [2] Ю.А. Водаков, Г.А. Ломакина, Е.Н. Мохов, В.Г. Одинг. ФТТ, **19**, 1812 (1977).
- [3] A.N. Andreev, A.S. Tregubova, M.P. Scheglov, A.L. Syrkin, V.E. Chelnokov. Mater. Sci. Eng., **B46**, 141 (1997).
- [4] А.А. Лебедев, Г.Н. Мосина, И.П. Никитина, Н.С. Савкина, Л.М. Сорокин, А.С. Трегунова. Письма ЖТФ, **27**, 57 (2001).
- [5] J.I. Goldstein et al. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis* (N. Y., Plenum. Press. 1981).
- [6] P. Zhou, M.G. Spenser, G.L. Harris, K. Fekade. Appl. Phys. Lett., **50**, 1385 (1987).
- [7] K. Zekentes, M. Kayambaki, G. Constantinidis. Appl. Phys. Lett., **66**, 3015 (1995).
- [8] A.M. Strel'chuk, V.S. Kiselev, S.E. Avramenko. Mater. Sci. Eng., **B61-62**, 437 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

3C-SiC $p-n$ structures obtained by sublimation epitaxy on 6H-SiC substrates

A.A. Lebedev, A.M. Strel'chuk, D.V. Davydov, N.S. Savkina, A.S. Tregubova, A.N. Kuznetsov, V.A. Solov'ev, N.K. Poletaev

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

Abstract On 6H-SiC substrates 3C-SiC epilayers n and p type conductivity were grown by the sublimation method. On the base of this epistructure were formed diodes and was done investigation of its parameters by the method of $I-V$ and $C-V$ characteristics, DLTS and electroluminescence. It was shown that characteristics of investigated diodes were close to those of diodes, formed on bulk 3C-SiC. It was concluded that method of sublimation epitaxy is suitable for growth of 3C-SiC $p-n$ structures on substrates made of other SiC polytypes.