

# Исследование слоев 3C-SiC, выращенных на подложках 15R-SiC

© А.А. Лебедев<sup>¶</sup>, П.Л. Абрамов, Е.В. Богданова, А.С. Зубрилов, С.П. Лебедев,  
Д.К. Нельсон, Н.В. Середова, А.Н. Смирнов, А.С. Трегубова

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

(Получена 5 августа 2008 г. Принята к печати 2 сентября 2008 г.)

Проведено исследование слоев 3C-SiC, выращенных на подложках 15R-SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме. Методами рентгеновской топографии и рамановской спектроскопии показано достаточно высокое структурное качество полученных эпитаксиальных слоев. По данным рамановской спектроскопии и вольт-фарадным измерениям установлено, что концентрация электронов в слое 3C-SiC составляет  $(4-6) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

PACS: 61.66.Fn, 61.72.Mm, 68.55.Jk, 73.61.Le, 78.30.Hv

## 1. Введение

Известно, что кубический карбид кремния (3C-SiC) отличается от других политипов SiC наибольшей подвижностью электронов ( $1200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ) [1], которая не зависит от кристаллографического направления. Остальные параметры (критическое электрическое поле, максимальные рабочие температуры, скорость насыщения электронов, теплопроводность) незначительно отличаются от параметров гексагональных политипов. Таким образом, 3C-SiC является весьма перспективным материалом для создания различных типов полупроводниковых приборов. В настоящее время технология выращивания объемных кристаллов 3C-SiC еще не разработана, и основным методом получения пленок 3C-SiC является гетероэпитаксия на подложках из других материалов, в том числе из гексагонального SiC. При зарождении кубического эпитаксиального слоя одновременно в разных точках (местах) гексагональной подложки имеются зародыши 3C-SiC двух ориентаций в плоскости роста с разворотом друг относительно друга на  $60^\circ$  (двойниковая структура) [2]. На границах двойников 3C-SiC образуются дефектные области (double position boundaries, DPB). В настоящее время одной из основных проблем в гетероэпитаксии 3C-SiC является уменьшение плотности двойниковых границ.

В предыдущей статье нами сообщалось о получении эпитаксиальных слоев 3C-SiC методом сублимации в вакууме на подложках 6H-SiC [3,4]. Однако в работе [5] было показано, что эпитаксиальные слои 3C-SiC, выращенные на подложках 15R-SiC, обладают меньшей плотностью двойников, чем слои, выращенные на подложках 6H-SiC в тех же технологических условиях. Авторы [5] объясняли это различной кинетикой роста террас для 15R-SiC и 6H-SiC.

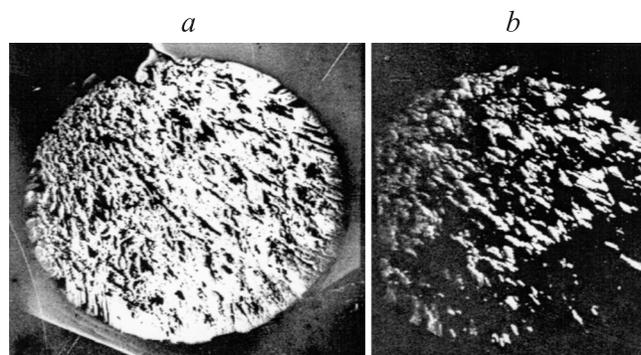
Цель настоящей работы состояла в получении методом сублимации в вакууме и исследовании гетероэпитаксиальных структур 3C-SiC/15R-SiC.

<sup>¶</sup> E-mail: Shura.Lebe@mail.ioffe.ru

## 2. Эксперимент

### 2.1. Структурное качество эпитаксиальных слоев

Рост эпитаксиальных слоев 3C-SiC осуществляли на грани (0001)C подложек 15R-SiC, выращенных методом Лэли. Эпитаксиальные слои были исследованы рентгеновской топографией с использованием метода обратного отражения. Топограммы снимались в отражениях (113) в  $\text{CuK}_\alpha$ -излучении. Толщина слоя, в котором формируется дифракционное изображение дефектов при этих условиях съемки,  $< 10 \text{ мкм}$ . Анализ топограмм показал, что эпитаксиальные слои отвечают структуре 3C-SiC и в основном в пределах толщин  $\sim 5 \text{ мкм}$  состоят из мелких двойниковых областей разного размера, которые ориентированы с разворотом на  $60^\circ$  друг относительно друга и выявляются на топограммах в темном или светлом контрасте. Типичное изображение двойниковой структуры слоя 3C-SiC на топограмме приведено на рис. 1. Как видно из рис. 1, на подложке 15R-SiC выращен сплошной эпитаксиальный слой 3C-SiC на площади  $1 \text{ см}^2$ .

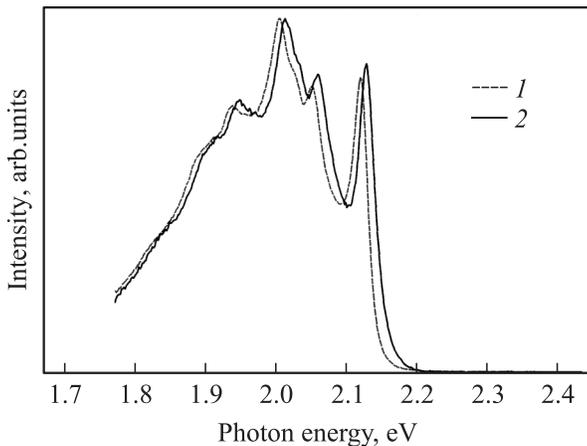


**Рис. 1.** Рентгеновские топограммы образца 3C-SiC/15R-SiC. *a* — двойниковая структура слоя 3C-SiC в отражении  $\bar{1}\bar{1}3$ ; *b* — та же структура с изменением контраста в изображении двойников при повороте на  $180^\circ$  (отражение  $\bar{1}\bar{1}3$ ).

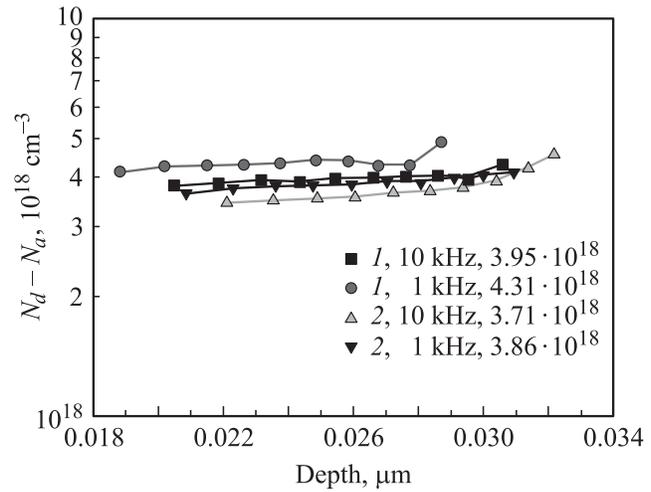
Из анализа полученных данных следует вывод, что при использовании подложек 15R-SiC возможно получать равномерные эпитаксиальные слои кубического политипа 3C-SiC по всей поверхности роста, без включений других политипов карбида кремния. В полученных образцах плотность двойников примерно соответствовала плотности двойников в эпитаксиальных слоях, выращенных на подложках 6H-SiC при тех же условиях. Таким образом, сделанный в работе [5] вывод о значительном подавлении двойникования при росте пленок 3C-SiC на подложках 15R-SiC в наших экспериментах не подтвердился.

## 2.2. Спектры фотолюминесценции и вольт-фарадные характеристики

На рис. 2 показан типичный спектр фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиального слоя на примере одного из выращенных образцов при температуре 6К. Исследования проводились в двух режимах — слабого возбуждения непрерывным аргоновым лазером (длина волны излучения 476.5 нм) и сильного возбуждения импульсным азотным лазером ЛГИ-505 (длина волны излучения 337.1 нм, длительность импульса 10 нс, частота повторения 1 кГц, мощность в импульсе 5 кВт). Фотолюминесценция регистрируется в красном спектральном диапазоне и однородна по всей площади эпитаксиального слоя 3C-SiC. Это показывает, что выращенный слой является 3C-SiC, вкраплений других политипов SiC не обнаружено. Как и в случае структур 3C-SiC/6H-SiC [3], спектр ФЛ состоит из ряда пиков, наиболее коротковолновый из которых при слабом возбуждении имеет максимум при энергии 2.125 эВ и может быть интерпретирован как излучательная рекомбинация донорно-акцепторных пар азот–алюминий в 3C-SiC [6]. Более длинноволновые пики представляют собой его фоновые повторения. Как и при исследовании пленок



**Рис. 2.** Низкотемпературные спектры люминесценции гетероструктуры 3C-SiC/15R-SiC при слабом (1) и сильном ( $1 \text{ МВт/см}^2$ ) возбуждении (2). Температура измерений  $T = 6 \text{ К}$ .



**Рис. 3.** Типичное распределение электрически активных примесей  $N_d - N_a$  в эпитаксиальном слое 3C-SiC на двух участках (1, 2) образца AZ-130, полученное из вольт-фарадных характеристик на частотах 1 и 10 кГц. Приведены усредненные значения концентрации в  $\text{см}^{-3}$ .

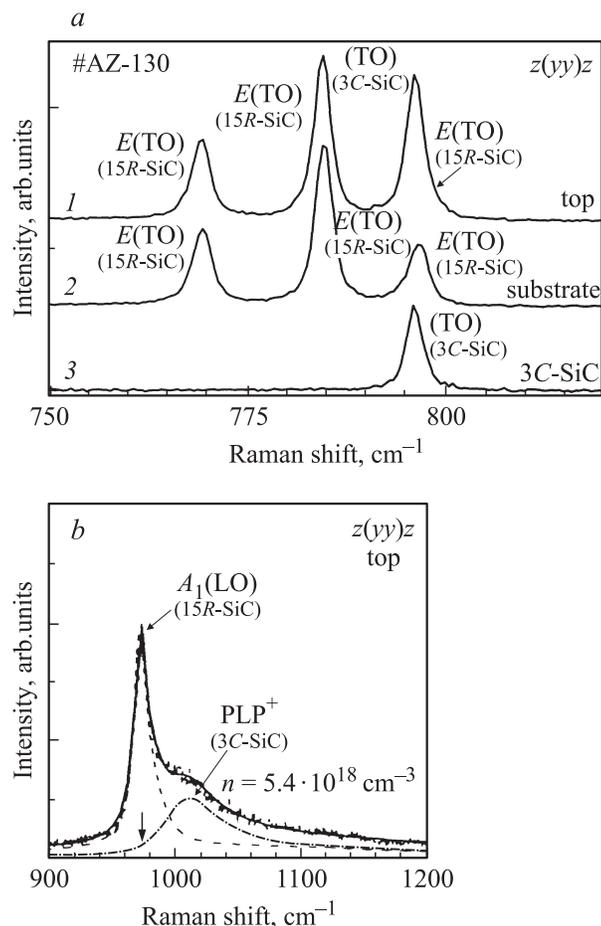
3C-SiC, выращенных на подложке 6H-SiC [3], в настоящей работе мы наблюдали смещение спектра в коротковолновую область при увеличении энергии возбуждения (рис. 2). Это может быть обусловлено тем, что при повышении плотности возбуждения происходит насыщение донорных уровней и более эффективной становится излучательная рекомбинация дырки на акцепторе и свободного электрона в зоне проводимости.

Концентрация и распределение электрически активных примесей (нескомпенсированных доноров  $N_d - N_a$ ) в выращенных слоях определялись из вольт-фарадных характеристик  $C(V)$ . Измерения проводились с помощью ртутного зонда при частотах синусоидального сигнала 1–10 кГц. Вольт-фарадные характеристики были линейными в координатах  $C^2(V)$ , что означало равномерное распределение примеси по глубине слоя (рис. 3).

## 2.3. Рамановские спектры выращенных структур 3C-SiC/15R-SiC

Рамановские спектры измерялись с помощью автоматизированной установки на основе двойного решеточного монохроматора ДФС-24 при комнатной температуре в геометрии обратного рассеяния  $z(yu)z$  (здесь направление  $z$  совпадает с направлением роста слоев). В качестве источника возбуждения использовался  $\text{Ag}^+$ -лазер с длиной волны излучения  $\lambda = 488 \text{ нм}$ . Спектральное разрешение составляло  $1.8 \text{ см}^{-1}$ . Калибровка спектров проводилась по линиям Ne-лампы.

Согласно правилам отбора, в рамановских спектрах, записанных в геометрии  $z(yu)z$ , должны наблюдаться для 3C-SiC поперечный (TO) и продольный (LO) оптические фононы симметрии  $T_1$ , а для кристалла 15R-SiC фононы симметрии  $E(\text{TO})$  и  $A_1(\text{LO})$  [7].



**Рис. 4.** *a* — рамановские спектры, полученные на структуре 3C-SiC/15R-SiC, образец AZ-130: 1 — спектр выращенного слоя 3C-SiC на подложке, 2 — спектр подложки 15R-SiC, 3 — разность спектров 1 и 2. *b* — рамановский спектр 3C-SiC в области продольного (LO) фонона; штриховая линия — аппроксимация контура линии  $A_1(\text{LO})$  слоя 15R-SiC функцией Лорентца, штрихпунктирная — результат расчета контура плазмон-фононной ( $\text{PLP}^+$ ) линии слоя 3C-SiC.

Спектр образца 3C-SiC/15R-SiC представлен на рис. 4, *a* (спектр 1). Так как слои SiC являются прозрачными для возбуждающего излучения с  $\lambda = 488$  нм, то при данной толщине слоя 3C-SiC ( $\sim 5$  мкм) в спектре (рис. 4, *a*, спектр 1), записанном с поверхности структуры, наблюдается вклад как от слоя 3C-SiC, так и от слоя 15R-SiC. Для того чтобы выделить только вклад от выращенного слоя 3C-SiC, был записан спектр подложки 15R-SiC (рис. 4, *a*, спектр 2). Спектр 3 на рис. 4, *a* представляет собой разность спектров 1 и 2. В спектре 3 наблюдается только одна линия, которая соответствует ТО-фонону кубического SiC. Ширина линии на половине высоты ТО-фонона равна  $2.4 \text{ см}^{-1}$ . Это значение близко к ширине линии на половине высоты ТО-фонона для слоя 3C-SiC, выращенного на подложке 6H-SiC [4]. Таким образом, согласно данным рамановских экспериментов, можно утверждать,

что слои 3C-SiC, выращенные на подложках 15R-SiC и 6H-SiC, имеют примерно одинаковое структурное качество. Спектр структуры 3C-SiC/15R-SiC, записанный в области энергий LO-фонона (рис. 4, *b*), состоит из двух линий. Низкочастотная линия связана с фононом  $A_1(\text{LO})$  слоя 15R-SiC (штриховой линией показана аппроксимация контура этой линии с помощью функции Лорентца), а высокочастотная линия относится к LO-фонону слоя 3C-SiC. Линия LO-фонона слоя 3C-SiC сдвинута в высокочастотную сторону по отношению к положению LO-фонона в нелегированном кристалле 3C-SiC (показан вертикальной стрелкой). Наблюдаемый сдвиг связан с наличием в слое свободных электронов. Вследствие взаимодействия продольных оптических колебаний с плазменными колебаниями свободных носителей заряда возникают смешанные плазмон-фононные моды (PLP) [8]. Известно, что по частотному положению и ширине этих мод можно оценить концентрацию и подвижность свободных электронов [8]. На рис. 4, *b* штрихпунктирной линией представлен результат расчета контура линии в рамках модели, развитой Клейном [8]. Наши расчеты показали, что концентрация электронов в слое 3C-SiC для образца AZ-130 составляет  $n = 5.4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а подвижность  $\mu \approx 47 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ . Значение концентрации  $n$  близко к значению, полученному из емкостных измерений.

### 3. Заключение

Проведенные исследования показали, что пленки 3C-SiC, выращенные на подложках 15R-SiC, обладают достаточно высоким структурным качеством. Эпитаксиальные слои занимают всю поверхность роста и однородны по площади. Гетеропереход между 3C-SiC и 15R-SiC является резким и не содержит переходных слоев каких-нибудь других политипов. В выполненных экспериментах не наблюдалось обнаруженного в работе [5] уменьшения средней плотности двойников в слое 3C-SiC по сравнению с ростом на подложках 6H-SiC. Возможно, это связано с тем, что в работе [5] использовался метод CVD и рост происходил при меньших температурах —  $1500^\circ\text{C}$  вместо  $\sim 2000^\circ\text{C}$  в настоящей работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 07-02-00919а.

### Список литературы

- [1] *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, ed. by M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev and M.S. Shur (John Wiley & Sons, Hoboken, N.J., 2001).
- [2] A.A. Lebedev. *Semicond. Sci. Technol.*, **21**, R17 (2006).
- [3] A.A. Лебедев, П.Л. Абрамов, В.В. Зеленин, Е.В. Богданова, С.П. Лебедев, Д.К. Нельсон, Б.С. Разбирин, М.П. Щеглов, А.С. Трегубова. *ФТП*, **41**, 273 (2007).

- [4] А.А. Лебедев, В.В. Зеленин, П.Л. Абрамов, С.П. Лебедев, А.Н. Смирнов, Л.М. Сорокин, М.П. Щеглов, R. Yakimova. Письма ЖТФ, **33** (12), 61 (2007).
- [5] F.R. Chien, S.R. Nutt, W.S. Yoo, T. Kimoto, H. Matsunami. J. Mater. Res., **9** (4), 940 (1994).
- [6] A. Suzuki, H. Matsunami, T. Tanaka. J. Electrochem. Soc.: Sol. St. Sci. Technol., **124** (2), 241 (1977).
- [7] D.W. Feldman, J.H. Parker, jr., W.J. Choyke, L. Parker. Phys. Rev., **173**, 787 (1968).
- [8] M.V. Klein. In: *Light Scattering in Solids*, v. 1, ed. by M. Cardona (Springer, Berlin, 1975).

Редактор Л.В. Шаронова

## Investigation of 3C-SiC layers grown on 15R-SiC substrates

A.A. Lebedev, P.L. Abramov, E.V. Bogdanova,  
A.S. Zubrilov, S.P. Lebedev, D.K. Nelson,  
N.V. Seredova, A.N. Smirnov, A.S. Tregubova

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

**Abstract** It was done investigation of 3C-SiC layers grown by sublimation epitaxy in vacuum on 15R-SiC substrates. By X-ray topography and Raman spectroscopy methods, enough high structural perfection of the obtained epilayers were shown. It was shown by Raman spectroscopy and capacitance–voltage methods that electron concentration in 3C-SiC layers was  $(4-6) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .