

06

## Получение квазисверхрешеток на границе эпитаксиального слоя 3C-SiC и подложек гексагональных политипов SiC методом сублимационной эпитаксии в вакууме

© А.А. Лебедев<sup>1,2</sup>, С.Ю. Давыдов<sup>1,2</sup>, Л.М. Сорокин<sup>1</sup>, Л.В. Шахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: LEV.Sorokin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2015 г.

Методом просвечивающей электронной микроскопии исследована структура переходного слоя между гексагональной подложкой (6H-SiC и 4H-SiC) и кубическим слоем карбида кремния, выращенным сублимационной эпитаксией в вакууме. Показано, что переходный слой толщиной  $\sim 200$  nm состоит из чередующихся слоев кубического (3C) и гексагонального (6H) карбида кремния, что установлено микрофракционным анализом. Продемонстрирована возможность получения такой технологией квазисверхрешеток 6H-SiC/3C-SiC и 4H-SiC/3C-SiC.

Одним из актуальных вопросов современной физики полупроводников является исследование различных низкоразмерных структур, в том числе полупроводниковых сверхрешеток (СР), представляющих собой многослойные структуры с периодическим чередованием сверхтонких слоев различных материалов, создающих дополнительный модулирующий потенциал для носителей заряда. Основными требованиями для создания СР являются: 1) послойный рост используемых материалов один за другим, 2) различие в ширине запрещенной зоны данных материалов, 3) нулевое несоответствие периодов кристаллических решеток данных материалов. На сегодняшний день наибольшие успехи по созданию СР достигнуты при работе с материалами  $A^2B^6$  и  $A^3B^5$ .

Известно, что отличительной особенностью карбида кремния является большое число политипов кристаллической решетки, у которых различная ширина запрещенной, но при этом рассогласование

параметров решетки незначительное. Теоретически было показано, что гетерополитипные структуры на основе SiC более перспективны, например, для изготовления НЕМТ-транзисторов, чем соединения III-N [1]. Существует ряд экспериментальных работ, в которых гетерополитипные структуры были получены как методом сублимационной эпитаксии [2–3], так и методом CVD [4–8].

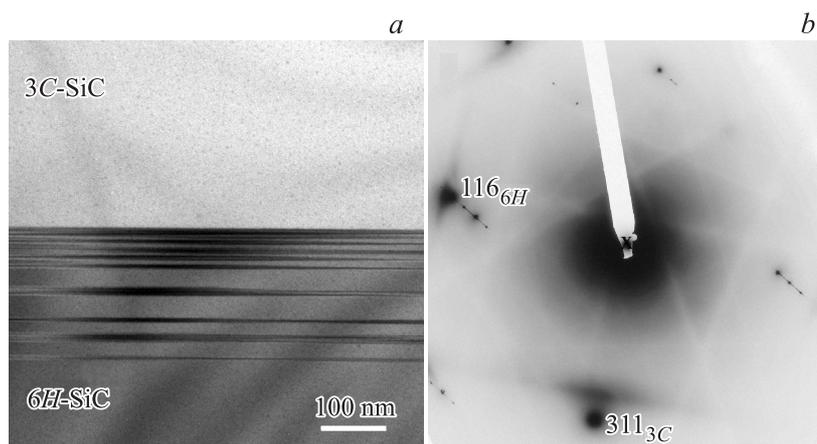
Ранее в [9] была показана возможность получения эпитаксиальной гетерополитипной  $p$ – $n$ -структуры ( $p$ )3C-SiC/( $n$ )6H-Si методом сублимации в вакууме. Отличительной особенностью последней является резкая гетерограница между политипами.

Однако в большинстве случаев при эпитаксиальном росте гетерополитипного материала всегда существует переходная зона, в которой решетки подстраиваются друг под друга. В предыдущей работе [2] нами отмечалось, что эта переходная зона между политипами 3C и 6H состоит из чередующихся полос двух политипов, образуя некое подобие СР. Поэтому создание СР на основе различных политипов карбида кремния является интересной исследовательской задачей.

В данной работе представлены сравнительные результаты исследований переходной зоны между эпитаксиальным слоем кубического политипа (3C-SiC) и подложками двух гексагональных политипов карбида кремния (6H-SiC, 4H-SiC).

Рост эпитаксиальных слоев 3C-SiC осуществлялся методом сублимационной эпитаксии в вакууме. В качестве подложки использовались коммерческие пластины фирмы Cree Inc. политипов 6H-SiC и 4H-SiC. Температура роста составляла 1850–1950°C, а время роста — 10 min. В качестве источника использовался коммерческий мелкозернистый порошок карбида кремния с диаметром зерна 10–20  $\mu\text{m}$ . Как известно из предыдущих публикаций, наиболее предпочтительной для гетерополитипного роста является  $C(000\bar{1})$ -грань подложки SiC [3], поскольку в этом случае образуется меньше паразитных включений политипа подложки в эпитаксиальном слое, а также наблюдается меньшая плотность дефектов.

Для характеристики переходной области между политипами применялся метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). ПЭМ-исследования были выполнены с использованием микроскопов JEOL JEM-2100F и Philips EM-420 с ускоряющим напряжением 200 и 100 kV соответственно. Для исследования были приготовлены поперечные срезы гетероструктур 3C-SiC/6H-SiC и 3C-SiC/4H-SiC с использо-

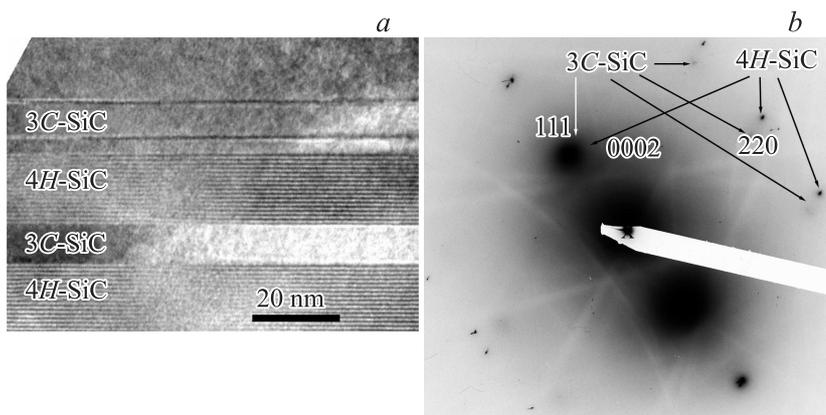


**Рис. 1.** *a* — ПЭМ-изображение переходной области 3C-SiC/6H-SiC; *b* — дифракционная картина, полученная от переходной области.

ванием стандартной для ПЭМ методики, включающей механическую шлифовку образцов на алмазных шкурках с последующим ионным травлением на установке Gatan Precision Ion Polishing System (PIPS) с энергией ионов аргона 4 keV.

Исследования границы роста эпитаксиальный слой/подложка с помощью метода ПЭМ показали наличие переходной области в случае использования трех различных подложек. Переходная область для трех контактов политипов отличалась как по толщине, так и по организации дефектного ансамбля. Толщину переходной области можно отсчитывать от глубины появления многократных вставок, так как этот процесс заканчивается появлением сплошного слоя кубического карбида кремния.

На рис. 1, *a* представлены ПЭМ-изображения переходной области для гетероструктуры 3C-SiC/6H-SiC. Толщина переходной области в первом случае составляет 210 nm и состоит из чередующихся неэквиливантных слоев двух политипов различной толщины. На дифракционной картине (рис. 1, *b*), полученной с переходного слоя между политипами 3C и 6H, присутствуют рефлексы как от гексагональной, так и от кубической решеток. Включений других политипов обнаружено не было. Следует отметить резкость (плоскостность) границы раздела



**Рис. 2.** — ПЭМ-изображение переходной области 3C-SiC/4H-SiC; *b* — дифракционная картина, полученная от переходной области.

между переходным слоем и верхним эпитаксиальным слоем кубического карбида кремния и увеличение плотности слоев политипов в направлении роста структуры при приближении к верхней части переходного слоя.

Для гетероструктуры 3C-SiC/4H-SiC наблюдается так же, как и в первом случае, чередование разных политипов (рис. 2, *a*), на сей раз 3C и 4H, однако переходная область имеет значительно меньшую толщину (64 nm) и всего лишь комбинацию из трех прослоек политипов 4H–3C–4H (снизу вверх), заключенную между объемами двух кристаллических решеток 3C и 4H. Дифракционная картина (рис. 2, *b*) также подтверждает отсутствие включений других политипов в переходной области, кроме 3C и 4H. Для рассматриваемого случая имеется существенное отличие структуры переходного слоя в сравнении с таковым при росте на подложке 6H-SiC. Как видно из рис. 2, *a*, слои 4H-SiC имеют идеальную периодичность квазиинтерференционных полос с периодичностью 1 nm. Слои 4H не случайно имеют одну и ту же периодичность и отличаются по числу полос на величину, кратную единице. Скорее всего, полосчатая структура 4H-слоев свидетельствует о спонтанном формировании в них идеальной сверхрешетки, состоящей из чередующихся политипов 3C и 4H одинаковой толщины

(1 nm). Однозначным доказательством этой версии будет проведение эксперимента с использованием микроскопии атомного разрешения. По-видимому, образование наблюдаемой сверхрешетки можно рассматривать как реализацию спиноподобного распада при росте эпитаксиальных слоев карбида кремния.

Таким образом, представленные выше результаты свидетельствуют о возникновении при росте 3C-эпитаксиального слоя на разных гексагональных подложках промежуточного слоя, состоящего из двух полтипов в виде чередующихся полос на электронно-микроскопическом изображении, которые можно рассматривать как квазисверхрешетку. Как было показано в данной работе, подобная структура переходного слоя характерна при гетероэпитаксии 3C-SiC не только на подложке 6H-SiC, но и на подложке 4H-SiC. В дальнейшем планируется провести исследования зависимости толщины переходной области, количества полтиповых слоев, а также их толщины от условий роста эпитаксиального слоя 3C-SiC. Такая информация позволит применить (и тем самым проверить) простую модель спиноподобного распада, предложенную в [2], для описания структуры переходной области.

Работа частично выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-02-00552. TEM investigation was made using the equipment of the Joint Research Centre „Material science and characterization in advanced technology“ (Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia).

Авторы благодарны С.П. Лебедеву и А.А. Ситниковой за помощь в проведении экспериментов и полезные обсуждения.

## Список литературы

- [1] Polyakov V.M., Schwierz F. // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 023 709.
- [2] Lebedev A.A., Zamoryanskaya M.V., Davydov S.Yu., Kirilenko D.A., Lebedev S.P., Sorokin L.M., Shustov D.B., Scheglov M.P. // J. Crystal Growth. 2014. V. 396. P. 100–103.
- [3] Lebedev S.P., Sitnikova A.A., Seredova N.V., Tregubova A.S., Lebedev A.A., Scheglov M.P. // Mater. Sci. Forum. 2013. V. 740–742. P. 267–270.
- [4] Chandrashekhnan M.S., Thomas C.I., Jie Li, Spenser M.G. // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 033 503.
- [5] Jie Li, Chandrashekhnan M.S., Parks J.J., Ralph D.C., Spenser M.G. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 162 115.

- [6] *Kim-Hak O., Ferro G., Dazord J., Marinova M., Lorenzzi J., Polychroniadis E., Chaussende P., Miele P.* // J. Crystal Growth. 2009. V. 311. P. 2385–2390.
- [7] *Vasiliauskas R., Juillaguet S., Syvajarvi M., Yakimova R.* // J. Crystal Growth. 2012. V. 348. P. 91–96.
- [8] *Vasiliauskas R., Vasiliauskas R., Syvajarvi M., Mantzari M., Andreadou A., Lorenzzi J., Ferro G., Polychroniadis E.K., Yakimova R.* // Mater. Sci. Forum. 2010. V. 645–648. P. 175–178.
- [9] *Лебедев А.А., Мосина Г.Н., Никитина И.П., Савкина Н.С., Сорокин Л.М., Трегубова А.С.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 57–63.