

# СУБСТРУКТУРА ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ $\beta$ -SiC, СИНТЕЗИРОВАННОЙ ПИРОЛИЗОМ МЕТАНА НА (111)Si МЕТОДОМ ИФО

С.А. Солдатенко, В.О. Кузьмина

<sup>1</sup>ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

<sup>2</sup>Воронежский государственный технический университет  
г. Воронеж, Российская Федерация

*Методами просвечивающей электронной микроскопии, дифракции быстрых электронов проведены исследования ориентации, структуры и морфологии пленок, образующихся при импульсной фотонной обработке излучением ксеноновых ламп пластин кремния (111) Si в атмосфере метана. Установлено, что при карбидизации поверхности кремниевой подложки формируется нанокристаллическая эпитаксиальная гетероструктура  $\beta$ -SiC/(111)Si. Питание зоны реакции осуществляется за счет восходящей поверхностной и граничной диффузии атомов Si через слой SiC, в результате в приграничной области подложки формируется система ограниченных полостей. Эпитаксия реализуется по двум ориентационным соотношениям (ОС), отвечающим ориентациям совпадения с высокой плотностью совпадающих узлов. Основное ОС одновременно удовлетворяет двум кристаллогеометрическим критериям эпитаксии. Межфазная граница некогерентная. Субструктура зерен  $\beta$ -SiC характеризуется высокой плотностью дефектов упаковки  $10^7$  см<sup>-2</sup> по (111), являющейся прослойкой гексагональной фазы. Высокоугловые ГЗ в пленке  $\beta$ -SiC являются границами специального типа, что обеспечивает низкую шероховатость поверхности, механическую и термическую прочность.*

**Ключевые слова:** импульсная фотонная обработка, карбид кремния, ориентация, субструктура, ориентационное соотношение, граница зерен, межфазная граница

## SUBSTRUCTURE OF THE EPITAXIAL FILM OF $\beta$ -SiC SYNTHESIZED BY PYROLYSIS OF METHANE ON (111) Si BY THE METHOD OF PPT

<sup>1</sup>V.O. Kuzmina, <sup>2</sup>S.A. Soldatenko

<sup>1</sup> Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy  
named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin"

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University  
Voronezh, Russian Federation

*By the methods of TEM and HEED the orientation, structure, and morphology of films*

*produced by pulsed photon treatment with xenon lamp radiation from silicon (111) Si plates in a methane atmosphere have been studied. It has been established that a carbonization of the surface of a silicon substrate forms a nanocrystalline epitaxial  $\beta$ -SiC / (111) Si heterostructure. The reaction zone is supplied by upward surface and boundary diffusion of Si atoms through the SiC layer, as a result, a system of faceted cavities is formed in the boundary region of the substrate. Epitaxy is realized by two orientation relationships, corresponding to coincidence orientations with high density of coincident sites. The main OS simultaneously satisfies two crystal geometric criteria for epitaxy. The interphase boundary is incoherent. The substructure of  $\beta$ -SiC grains is characterized by a high packing density of  $10^7 \text{ cm}^{-2}$  in (111), which are streaks of the hexagonal phase. High-angle GB in the  $\beta$ -SiC film is a special type of boundary, which provides low surface roughness, mechanical and thermal durability.*

**Keywords:** pulse photon treatment, silicon carbide, orientation, substructure, orientation relationship, grain boundary, interphase boundary

**E-mail:** cossack408@mail.ru

### **Введение**

Эпитаксиальные гетероструктуры пленки  $\beta$ -SiC на монокристалле Si нашли широкое применение в микроэлектронике, во многих случаях заменяя элементную базу на дорогостоящих подложках карбида кремния. На их основе изготавливают радиационно-стойкие светодиоды, различные типы полевых транзисторов, туннельные диоды, счетчики частиц высокой энергии и т.д. [1]. Однако вследствие большого структурного несоответствия решеток и различия коэффициентов термического расширения SiC и Si кристаллическое совершенство эпитаксиального слоя SiC на Si существенно уступает по качеству монокристаллической подложке, что отрицательно сказывается на электрофизических характеристиках приборов [2, 3]. Для создания эпитаксиальных гетероструктур SiC / моно-Si наибольшую популярность получили различные варианты химического газофазного осаждения [4–8] и молекулярно-лучевой эпитаксии [9]. На протяжении 20 последних лет усилия исследователей были направлены на поиск путей совершенствования структуры эпитаксиальных слоев. На сегодняшний момент в решении этой проблемы достигнут очевидный прогресс, совершенство эпитаксиального слоя  $\beta$ -SiC приблизилось по показателям к коммерческим монокристаллическим подложкам [10]. В частности установлено, что для получения более совершенного слоя SiC на Si необходимой операцией перед его эпитаксией является карбидизация поверхности кремния (синтез буферной эпитаксиальной гетероструктуры  $\beta$ -SiC/Si) [11]. Традиционно карбидизацию поверхности кремния осуществляют термической обработкой пластин при температуре 1100–1350 °C в атмосфере с низким парциальным давлением углеродсодержащих газов. Толщина эпитаксиального карбидкремниевого слоя, полученного традиционными методами, обычно не превышает двух десятков нанометров, что недостаточно для реализации еще одного назначения гетероструктуры  $\beta$ -SiC/Si – способности демпфировать напряжения, возникающие при эпитаксиальном наращивании рабочих слоев SiC толщиной более 1 мкм [12]. Кроме того, температурный диапазон карбидизации поверхности кремния в большинстве случаев не совместим с режимами кремниевой технологии. Анализ работ последних лет по данной тематике показывает, что ведутся исследования более низкотемпературных режимов карбидизации поверхности Si в основном путем подбора состава газовой атмосферы [13] и использования ассистирующего действия плазмохимических методов синтеза [14]. Синтез пленок  $\beta$ -SiC на кремниевой подложке методом импульсной фотонной обработки (ИФО) излучением мощных ксеноновых ламп, хорошо зарекомендовавший себя при синтезе пленок сили-

цидов металлов [14, 15] и карбида вольфрама [16], практически не исследован.

*Цель данной работы* – синтез пленок  $\beta$ -SiC на подложке (111)Si методом импульсной фотонной обработки (ИФО) в атмосфере метана. Систематизация структуры, субструктуры и ориентации пленок  $\beta$ -SiC и межфазной границы  $\beta$ -SiC/(111)Si.

### Методика эксперимента и методы исследования

Синтез гетероструктур  $\beta$ -SiC/Si осуществляли методом ИФО пластин кремния марки КДБ-10 ориентацией (111) толщиной 450 мкм в атмосфере метана. Перед помещением пластин Si в вакуумную камеру их поверхность освежали в растворе  $\text{HF:H}_2\text{O} = 1:1$ , обрабатывали в перекисно-аммиачной смеси  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH} = 6:1$  и промывали в деионизованной воде. После установки пластин вакуумную камеру откачивали турбомолекулярным насосом до давления остаточной атмосферы  $6.6 \cdot 10^{-3}$  Па. Затем в камеру подавали метан чистотой не менее 99,9 %, поддерживая рабочее давление  $1.3 \cdot 10^{-2}$  Па. ИФО пластин проводили на установке УОЛП-1М излучением трех газоразрядных ксеноновых ламп ИНП 16/250 (спектральный диапазон  $\lambda = 0.2\text{--}1.2$  мкм), работающих в импульсном режиме ( $10^{-2}$  с) бегущей волны пакетами импульсов. Длительность пакетов световых импульсов составляла 3 с, ток в лампах – 130 А, что соответствовало плотности энергии поступающей на образец  $E_{\text{и}} = 273$  Дж·см<sup>-2</sup>, в результате устанавливался режим теплового баланса при температуре подложки около 1600 К.

Ориентацию, структуру и субструктуру пленок SiC исследовали методами ПЭМ, ДБЭ на электронном микроскопе TITAN 80–300 (FEI), Carl Zeiss Libra 120 и электронографе ЭГ-100. Образцы для ПЭМ-исследования готовили ионным утонением на установке Gatan и отделением пленки SiC от кремниевой подложки в растворе  $\text{HF} : \text{HNO}_3 = 1 : 10$ .

### Результаты и их обсуждение

Ранее в работах [17, 18] установлено, что для пленок характерна достаточно четкая двухосная текстура в трех симметрично эквивалентных позициях по ориентационному соотношению (ОС)

$$(111), [1 \bar{1} 0] \text{ SiC} \parallel (111), [1 \bar{1} 0] \text{ Si.} \quad (1)$$

Кроме того, наряду с параллельной ориентацией (1) имеются зерна в двойниковой (180-градусной) ориентации и произвольно ориентированные зерна. В приповерхностную область выходят, преимущественно эпитаксиально ориентированные кристаллиты. Субструктура пленок – нанокристаллическая с высокой плотностью дефектов упаковки (ДУ) и микродвойниковых прослоек. Высокая дисперсность пленок при хорошо выраженной текстуре обусловлена двухориентационной (с учетом 180-градусной позиции) эпитаксии, легкостью двойникования и образования дефектов упаковки.

В настоящей работе структура и субструктура эпитаксиальной пленки  $\beta$ -SiC на (111)Si, синтезированной методом ИФО пластин кремния в атмосфере метана, рассмотрены более детально. Из анализа электронограммы, представленной на рис. 1, следует, что кроме основной ориентации по ОС (1) в пленке присутствуют зерна, отвечающие дополнительному ОС

$$(121), [1 0 \bar{1}] \text{ SiC} \parallel (111), [1 0 \bar{1}] \text{ Si.} \quad (2)$$

Рефлексы  $1/3$  422 на электронограмме (рис.1, а) имеют нехарактерно высокую интенсивность (около 20 % от интенсивности 220) и близки по относительной интенсивности к рефлексам типа  $1 \bar{1} 00$  для гексагонального политипа SiC(8H) со степенью гексагональности  $\gamma = 0.25$ . Как известно, в кристаллической решетке  $\beta$ -SiC (F43m) узлы, образующие дефект упаковки по плоскостям {111}, находятся в гексагональных позициях, амплитуда рассеяния от которых и дает вклад в интенсивность отражений  $1/3$  422. Очевидно, интенсивность этих рефлексов на электронограмме зависит от

плотности ДУ по плоскости (111) и коррелирует со степенью гексагональности фазы  $\beta$ -SiC. Плотность ДУ, оцененная по относительной интенсивности  $1/3$  422, составляет не менее  $10^7$  см<sup>-2</sup>. Несмотря на достаточно высокую степень гексагональности пленок  $\beta$ -SiC, отражения, идентифицирующие многочисленные политипы  $\alpha$ -SiC, на электронограммах отсутствуют, что позволяет характеризовать синтезированные пленки как фазу  $\beta$ -SiC с высокой плотностью неупорядоченных по глубине пленки ДУ (111). Отражения проиндексированные дробными индексами  $1/3$  442 и  $1/3$  115 возникают вследствие достаточно высокой плотности микродвойников второго порядка по плоскостям  $\{11\bar{1}\}$  субзерен SiC в основной ориентации.

Как видно из ПЭМ-изображений (рис. 1, б, в), пленки  $\beta$ -SiC – нанокристаллические, имеющие блочную мозаичную субструктуру. Размер блоков субзерен составляет около 30 нм. Средний размер субзерна, определенный из статистической обработки размеров областей когерентного рассеяния на темнопольных изображениях, составляет 5 нм. Границы блоков образованы  $120^\circ$ -границами двойникового типа в соответствии с трехпозиционной текстурой по соотношению (1). Ослабление адсорбционного контраста, наблюдаемое по границам блоков, связано с уменьшением толщины пленки в окрестности межблочных границ.

Анализ ОС показал, что на межфазных границах при сопряжении по плоскостям (111)SiC || (111)Si и (121)SiC || (111)Si реализуются ориентации, характеризующиеся наиболее высокой плотностью совпадающих узлов с  $\Sigma_1/\Sigma_2 = 16/25$  для ОС (1),  $\Sigma_1/\Sigma_2 = 36/20$  для ОС (2). Элементарные ячейки РСУ показаны на схемах сопряжения (рис. 1, г, д). Очевидно, более низкие значения  $\Sigma_1/\Sigma_2$  и совпадение симметрии сопрягаемых решеток для ОС (1) обуславливают преимущество этой текстуры над текстурой по (2).

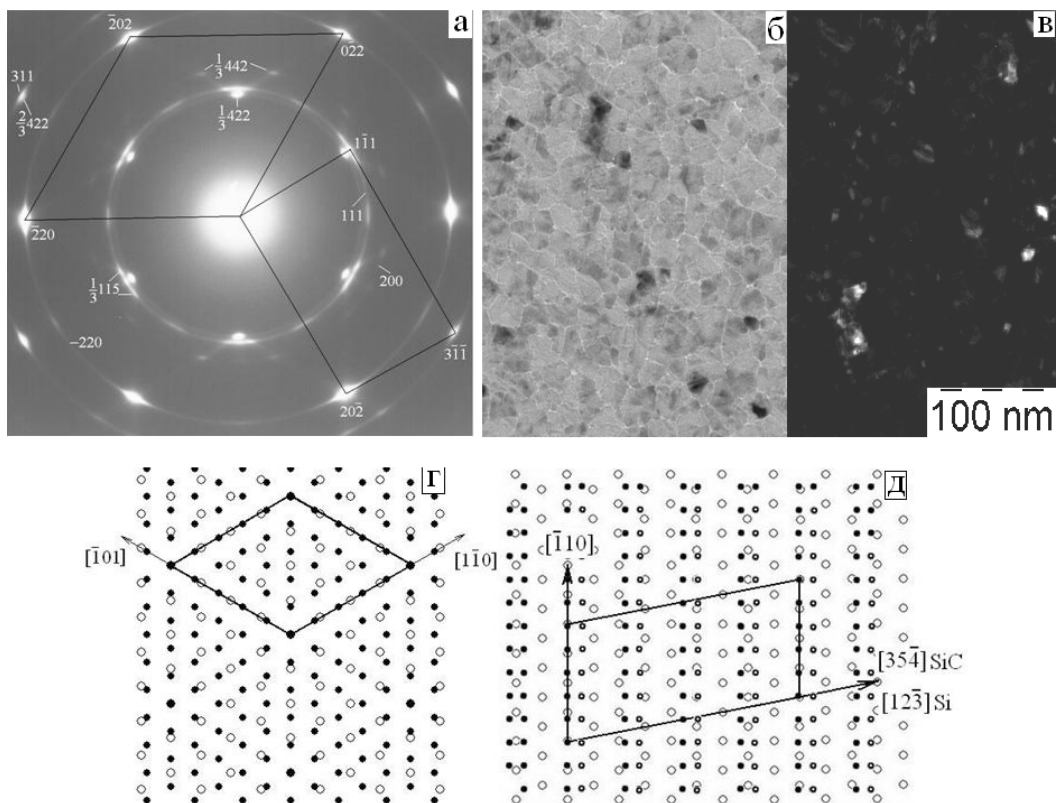


Рис. 1. Электронограмма (а), светлопольное и темнопольное ПЭМ-изображения пленки  $\beta$ -SiC, синтезированной на (111)Si, и картины сопряжения решеток по ОС (1) – (б) и (2) – (в)

Более развернутую информацию о гетероструктуре  $\beta$ -SiC/(111)Si дает ПЭМ-изображение ее поперечного сечения по оси  $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$ . Как видно из рис. 2, пленка  $\beta$ -SiC покрывает поверхность (111) подложки кремния однородным слоем толщиной 16 нм. В приграничной области подложки локализованы ограненные полости с средней плотностью  $\sigma = 9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}$ , латеральным размером  $b = 140 \text{ нм}$  и глубиной  $h = 90 \text{ нм}$ . Огранка полостей в основном по плоскостям {111} образует усеченный тетраэдр Томпсона (рис. 2, в), что и определяет формы открывающихся окон при выходе к пленке SiC от правильного треугольника до разностороннего гексагона (наиболее часто встречаемая форма показана на рис. 2, г). Конкретные механизмы образования полостей при карбидизации поверхности кремния до сих пор обсуждаются [19]. Однако очевидно, что причиной является низкая диффузионная подвижность атомов углерода через пленку SiC. Реакция протекает главным образом на поверхности SiC, питание которой осуществляется выносом атомом кремния путем поверхностной и зернограничной диффузии. В этом случае, зная объем израсходованного кремния, можно провести оценку толщины пленки SiC по формуле

$$t \sim \mu_{\text{SiC}} \cdot \rho_{\text{Si}} \cdot \sigma \cdot b^2 \cdot h / \mu_{\text{Si}} \cdot \rho_{\text{SiC}}$$

где  $\mu_{\text{SiC}}$  и  $\mu_{\text{Si}}$  – соответствующие молярные массы,  $\rho_{\text{Si}}$  и  $\rho_{\text{SiC}}$  – плотности Si и SiC,  $b$  и  $h$  – средний латеральный размер и глубина полости,  $\sigma$  – поверхностная плотность полостей. Согласно оценке толщина сплошной пленки SiC составляет около 16 нм, что совпадает с наблюдаемым значением.

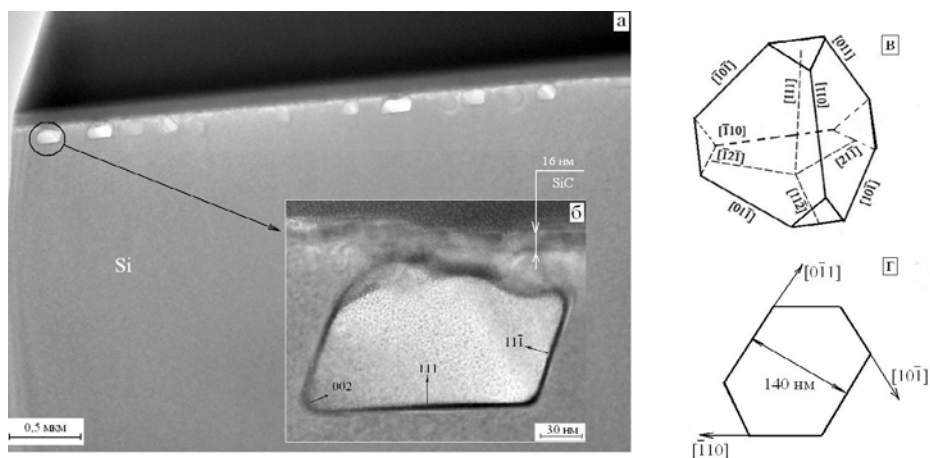


Рис. 2. ПЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры  $\beta$ -SiC/(111)Si (а), увеличенный фрагмент (б), схема огранки полости (в) и наиболее часто встречаемая форма окна при выходе к пленке SiC (г)

На рис. 3 представлено ПЭМ-изображение высокого разрешения участка гетероструктуры  $\beta$ -SiC/(111)Si, детализирующая субструктуру пленки SiC и межфазной границы. Согласно Фурье преобразованиям от выделенных областей (рис. 3, в, г, д), субзерно А находится в параллельной позиции, субзерна В и С – в  $180^\circ$ -позиции, субзерно D является микродвойником по отношению к А по плоскости  $(1\ 1\ \bar{1})$ .

Соответственно все межзеренные границы (ГЗ) на данном участке относятся к специальному типу: ГЗ между А и В –  $180^\circ$ -типа, почти параллельна плоскостям  $(1\ 1\ \bar{1})$  зерна В, ГЗ между А и D – двойниковая граница по плоскости  $(1\ 1\ \bar{1})$  зерна А, ГЗ между С и D – высокоугловая граница совпадения. В окрестности ГЗ  $180^\circ$ -типа зафиксирован наибольший перепад толщины пленки, что, по-видимому, указывает на относительно высокое значение ее энергии.

Межфазная граница  $\beta$ -SiC/(111)Si – некогерентная и характеризуется отсутствием дислокации несоответствия. Муаровый контраст в окрестности межфазной границы

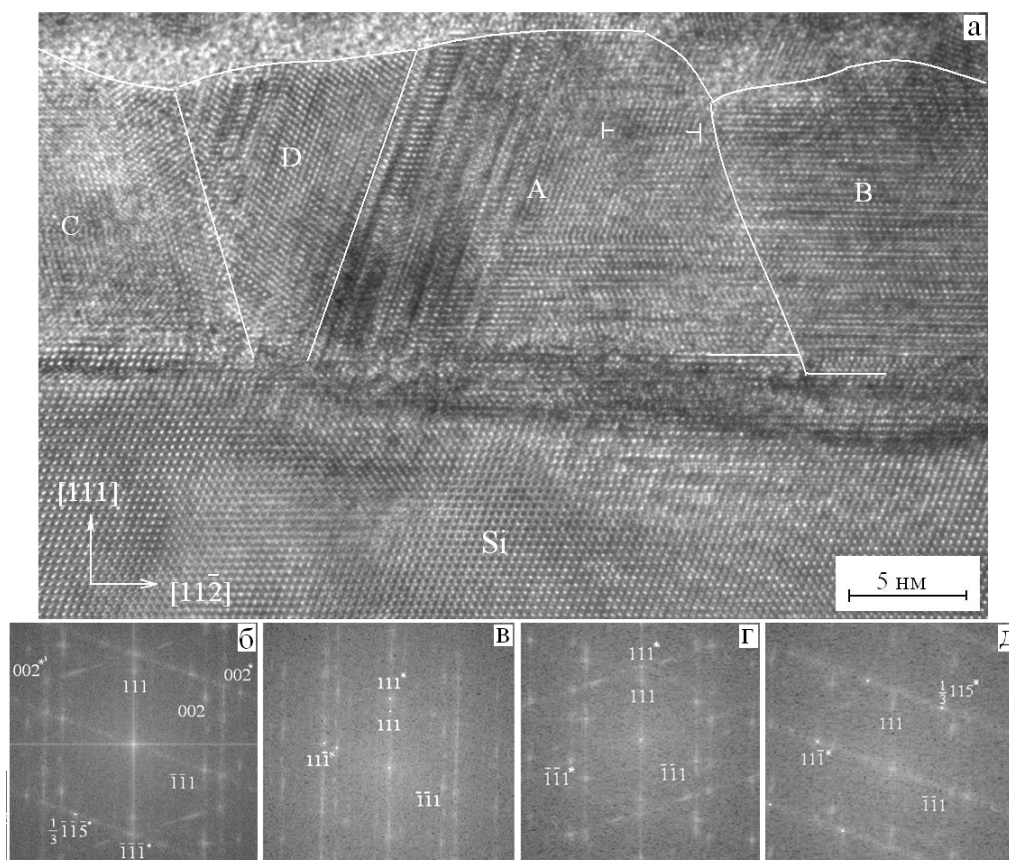


Рис.3. ПЭМ-изображение высокого разрешения гетероструктуры  $\beta$ -SiC/(111) Si (a), Фурье-преобразования от всего изображения (б), правой части субзерна А (в), субзерен В и С (г), субзерна D (д) (рефлексы  $hkl$  принадлежат Si,  $hkl^*$  – SiC)

с периодом 1,4 нм, соответствующий двойной дифракции на параллельных плоскостях (111) решеток Si и SiC, свидетельствует о локальном уходе ее ориентации от (111) с неизбежным фасетированием. Действительно, участок между зернами А и В содержит трехатомную ступеньку на подложке. В этом случае между плоскостями (111) сопрягаемых зерен возникает позиционное несоответствие со сдвигом в 4 %, устраняемое дислокационной петлей Франка с вектором Бюргерса  $1/3 [111]$  (отмечено на рис. 3, а), тем самым обеспечивается когерентность сопряжения (111) через ГЗ.

В соответствии с данными полученными выше из анализа картины общей дифракции, субзерна пленки содержат высокую плотность дефектов упаковки (не менее  $10^7 \text{ см}^{-2}$ ) по (111) с векторами сдвига типа  $1/6 \langle 112 \rangle$ , по-видимому, ростового происхождения, а также многочисленные микродвойниковые прослойки по  $\{11\bar{1}\}$ , снимающие локальные напряжения.

### Выводы

1. При карбидизации поверхности кремниевой подложки в атмосфере метана методом ИФО пластин кремния, формируется нанокристаллическая эпитаксиальная пленочная гетероструктура  $\beta$ -SiC/(111)Si. Питание зоны реакции осуществляется за счет восходящей поверхностной и граничной диффузии атомов Si через слой SiC, в результате в приграничной области подложки формируется система ограненных полостей.

2. Эпитаксия реализуется по двум ориентационным соотношениям (OC), отвечающим ориентациям совпадения с высокой плотностью совпадающих узлов. Основное

ОС удовлетворяет одновременно двум кристаллогеометрическим критериям эпитаксии. Межфазная граница некогерентная.

3. Субструктура зерен  $\beta$ -SiC характеризуются высокой плотностью дефектов упаковки  $10^7 \text{ см}^{-2}$  по (111), являющимися прослойками гексагональной фазы.

4. Высокоугловые ГЗ в пленке  $\beta$ -SiC являются границами специального типа, что обеспечивает низкую шероховатость поверхности, механическую и термическую прочность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лебедев, А.А. Вечнозеленый полупроводник [Текст] / А.А. Лебедев // Химия и жизнь. – 2006. – №4. – С. 14–19.
2. Лучинин, В.В. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету [Текст] / В.В. Лучинин, Ю.Н. Таиров // Современная электроника. – 2009. – №7. – С. 12–15.
3. Cheng, L. Growth and Doping of SiC-Thin Films on Low-Stress, Amorphous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si Substrates for Robust Microelectromechanical Systems Applications [Text] / L.Cheng [and others] // Journal of Electronic Materials. – 2002. – V. 31. – №5. – P. 361–365.
4. Chen, Y. Heteroepitaxial growth of 3C-SiC using HMDS by atmospheric CVD [Text] / Y. Chen // J. Mater.Sci. and Eng. – 1999. – V.61–62. – P. 579–582.
5. Hatanaka, Y. Experiments and analyses of SiC thin film deposition from organo-silicon by a remote plasma method [Text] / Y. Hatanaka // Thin Solid Films. – 2000. – №2. – P. 287–291.
6. Ellison, A. Epitaxial growth of SiC in a chimney CVD reactor [Text] / A. Ellison // J. Cryst. Growth. – 2002. – №1–3. – P. 225–238.
7. Luo, M. C. Epitaxial growth and characterization of SiC on C-plane sapphire substrates by ammonia nitridation [Text] / M. C. Luo // J. Cryst. Growth. – 2003. – №1–2. – P. 1–8.
8. Attenberger, W. Structural and morphological investigations of the initial stages in solid source molecular beam epitaxy of SiC on (111)Si [Text] / W. Attenberger [and others] // J. Materials Science and Engineering: B. – 1999. – V. 61–62. – P. 544–548.
9. Shimizu, H. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates [Text] / H. Shimizu, K. Hisada // Materials Science Forum. – 2003. – V.433–436. – P. 229–232.
10. 3C–SiC Epitaxy on Deeply Patterned Si(111) substrates [Text] / T.Kreiliger [et al.] // Materials Science Forum.– 2016.– V.858.–P.151–154.
11. Кукушкин, С.А. Синтез эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния [Текст] / С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, В. 8. – С. 1457–1485.
12. Ferro, G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail [Text] / G. Ferro // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2015. – №40. – С. 56–76.
13. Bittencourt, C. Reaction of Si(100) with Silane-Methane Low-Power Plasma; SiC Buffer layer formation [Text] / C. Bittencourt // Journal of Applied Physics. – 1999. – V. 86. – P. 4643–4648.
14. Иевлев, В.М. Состав и структура силицидов образующихся при импульсной фотонной обработке пленок титана на монокристаллическом к аморфном кремнии [Текст] / В.М. Иевлев [и др.] // ФХОМ. – 1997. – №4. – С. 62–67.
15. Иевлев, В.М. Твердофазный синтез силицидов при импульсной фотонной обработке гетеросистем Si–Me (Me: Pt, Pd, Ni, Mo, Ti) [Текст] / В.М. Иевлев, С.Б. Куцев, В.Н. Санин // ФХОМ. – 2002. – №1. – С. 27–31.
16. Иевлев, В.М. Синтез силицидов иридия при импульсной фотонной обработке пленок металла на кремнии [Текст] / В.М. Иевлев [и др.] // Вестник ВГТУ, сер. «Материаловедение». – 2002. – Вып. 1.11. – С. 87–93.
17. Иевлев, В.М. Синтез наноструктурированных пленок SiC при импульсной фотонной обработке Si в углеродсодержащей среде [Текст] / В.М. Иевлев [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2009. – №10. – С. 48–53.
18. Куцев, С.Б. Синтез пленок SiC на Si при импульсной фотонной обработке и быстром термическом отжиге в углеродсодержащей среде [Текст] / С.Б. Куцев, С.А. Солдатенко // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – №7. – С. 18–22.
19. La Via, F. Silicon Carbide Epitaxy [Text] / F.La Via // Published by Research Signpost.–2012.– 260 P.

#### REFERENCES

1. Lebedev A.A. Vечнозеленый полупроводник [Evergreen semiconductor] Chemistry and Life, 2006, No. 4. P. 14–19. (in Russian)
2. Luchinin V.V., Tairov Yu.N. Otechestvennyj poluprovodnikovyj karbid kremniya: shag k paritetu [Domestic semiconductor silicon carbide: a step to parity] Modern electronics. 2009. No. 7. P. 12–15. (in Russian)
3. Cheng L. [et al.] Growth and Doping of SiC-Thin Films on Low-Stress, Amorphous Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> / Si Substrates for Robust Microelectromechanical Systems Applications / Journal of Electronic Materials. – 2002. – V. 31. – No. 5. – P. 361–365.

4. Chen Y. Heteroepitaxial growth of 3C-SiC using HMDS by atmospheric CVD / J. Mater.Sci. and Eng. 1999. V. 61–62. P. 579–582.
5. Hatanaka Y. Experiments and analyses of SiC thin film deposition from organo-silicon by a remote plasma method [Text] Thin Solid Films. 2000. No. 2. P. 287–291.
6. Ellison, A. Epitaxial growth of SiC in a chimney CVD reactor / A. Ellison // J. Cryst. Growth. 2002. N°1–3. P. 225–238.
7. Luo, M. C. Epitaxial growth and characterization of SiC on C-plane sapphire substrates by ammonia nitridation/ J. Cryst. Growth. 2003. N°1–2. P. 1–8.
8. Attenberger W. [et al.] Structural and morphological studies of the initial stages in a solid-state molecular beam epitaxy of SiC on (111) Si / J. Materials Science and Engineering: B. 1999. V. 61–62. P. 544–548.
9. Shimizu H., Hisada K. Hetero-Epitaxial Growth of 3C-SiC on Carbonized Silicon Substrates / Materials Science Forum. 2003. V.433–436. P. 229–232.
10. Kreiliger T., M.Mauceri, Puglisi M., Mancarella F., La Via F., Crippa D., Kaplan W., Schöner A., Marzegalli A., Miglio L., Känel H. 3C-SiC Epitaxy on Deeply Patterned Si(111) substrates / Materials Science Forum. 2016. V.858. P.151–154.
11. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Feoktistov N.A. Sintez ehpitaksial'nyh plenok karbida kremniya metodom zameshcheniya atomov v kristallicheskoj reshetke kremniya [Synthesis of epitaxial silicon carbide films by the substitution of atoms in the silicon lattice]. Physics of the solid body. 2014. T. 56, V. 8. P. 1457–1485. (in Russian)
12. Ferro G. 3C-SiC Heteroepitaxial Growth on Silicon: The Quest for Holy Grail / Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2015. No. 40. P. 56–76.
13. Bittencourt C. Reaction of Si (100) with Silane-Methane Low-Power Plasma; SiC Buffer layer formation / Journal of Applied Physics. 1999. V. 86. P. 4643–4648.
14. levlev V.M. [et al.] Sostav i struktura silicidov obrazuyushchihysya pri impul'snoj fotonnoj obrabotke plenok titana na monokristallicheskom k amorfnom kremnii [Composition and structure of silicides formed by pulsed photonic processing of titanium films on a single crystal to amorphous silicon] / FHOM. 1997. N°4. P. 62–67. (in Russian)
15. levlev V.M., Kushchev S.B., Sanin V.N. Tverdogaznyj sintez silicidov pri impul'snoj fotonnoj obrabotke getero-sistem Si–Me (Me: Pt, Pd, Ni, Mo, Ti) [Solid-phase synthesis of silicides during pulsed photonic processing of Si–Me heterostructures (Me: Pt, Pd, Ni, Mo, Ti)] / FHOM. 2002. No. 1. P. 27–31. (in Russian)
16. levlev V.M. [et al.] Sintez silicidov iridiya pri impul'snoj fotonnoj obrabotke plenok metalla na kremnii [Synthesis of iridium silicides for pulsed photonic processing of metal films on silicon] / Bulletin of VSTU, ser. "Material Science". 2002. Issue. 1.11. P. 87–93. (in Russian)
17. levlev V.M. [et al.] Sintez nanostrukturirovannyh plenok SiC pri impul'snoj fotonnoj obrabotke Si v uglerod-soderzhashchej srede [Synthesis of nanostructured SiC films during pulsed photon processing of Si in a carbon-containing medium] / Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. 2009. N°10. P. 48–53. (in Russian)
18. Kushchev S.B., Soldatenko S.A. Sintez plenok SiC na Si pri impul'snoj fotonnoj obrabotke i bystrom termicheskom otzhige v uglerodsoderzhashchej srede [Synthesis of SiC films on Si under pulsed photon processing and rapid thermal annealing in a carbon-containing medium] / Alternative Energy and Ecology. 2011. N°7. P. 18–22. (in Russian)
19. La Via, F. Silicon Carbide Epitaxy / Published by Research Signpost. 2012. 260 P.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 31.05.18*