

Научная статья

УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-113-122

ПОЛИТИПНЫЕ МОДИФИКАЦИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ В ПОКРЫТИЯХ*Д.В. Сидоров¹, А.А. Шавнев¹*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Представлен обзор научно-технической литературы в области кристаллических покрытий из карбида кремния различных политипных модификаций и способов их получения. Рассмотрены перспективные области применения наиболее распространенных кристаллических политипных модификаций карбида кремния: детекторы для темной материи, биосенсоры, силовые устройства и микроэлектроника. Описаны подходы к изучению преимущественного образования того или иного политипа карбида кремния в кристаллических покрытиях.

Ключевые слова: карбид кремния, политипная модификация, кристалл, превращение, получение, применение

Для цитирования: Сидоров Д.В., Шавнев А.А. Политипные модификации карбида кремния в покрытиях // Труды ВИАМ. 2026. № 5 (159). С. 113–122. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-113-122.

Scientific article

POLYTYPE MODIFICATIONS OF SILICON CARBIDE IN COATINGS*D.V. Sidorov¹, A.A. Shavnev¹*

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article presents a review of scientific and technical literature in the field of crystalline coatings of silicon carbide of various polytype modifications and methods for their production. The paper examines promising areas of application for the most common crystalline polytypic modifications of silicon carbide, which include dark matter detectors and biosensors, in addition to power devices and microelectronics. Approaches to studying the preferential formation of one or another polytype of silicon carbide in crystalline coatings are described.

Keywords: silicon carbide, polytype modification, crystal, transformation, producing, application

For citation: Sidorov D.V., Shavnev A.A. Polytype modifications of silicon carbide in coatings. *Trudy VIAM*, 2026, no. 5 (159), pp. 113–122. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-5-113-122.

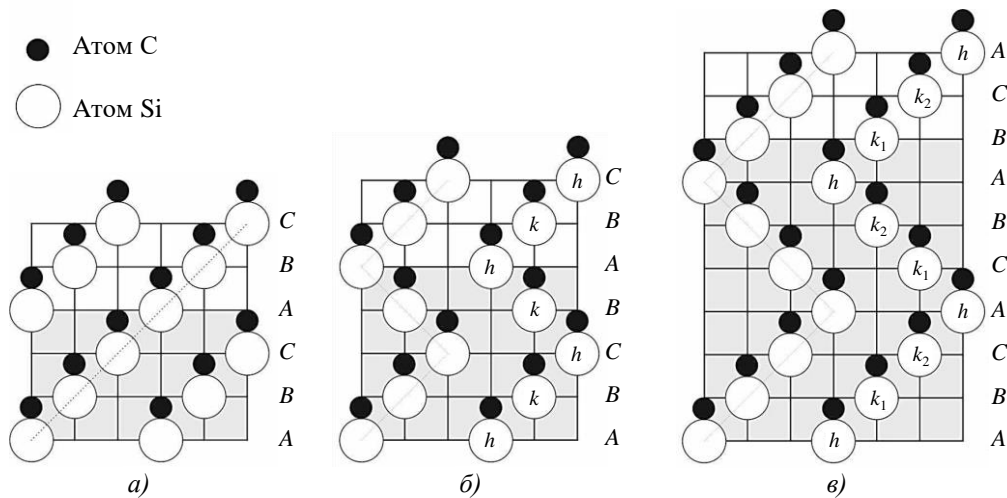
Введение

Развитие синтетического способа получения карбида кремния методом Ачесона до промышленных масштабов позволило использовать его в больших объемах в качестве абразивного материала для металлообрабатывающей отрасли и как огнеупорный материал в металлургии. Обнаруженные впоследствии полупроводниковые свойства

карбида кремния послужили началом его применения в микроэлектронных, оптических и микроэлектромеханических устройствах [1, 2].

В настоящее время количество возможных политипных модификаций SiC превышает 250 [3, 4]. Наиболее известными среди них считаются следующие: 3C-SiC, 2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC, 8H-SiC, 10H-SiC, 14H-SiC, 20H-SiC, 21H-SiC, 9R-SiC, 15R-SiC, 19R-SiC, 24R-SiC и 33R-SiC. Политипные модификации SiC представляют собой ориентированные определенным образом последовательные слои, в которых сохраняется тетраэдрическая связь [5]. Относительно недавно описана новая орторомбическая политипная модификация 6O-SiC, представляющая интерес для микроэлектроники [6].

На рисунке представлено структурное построение политипных модификаций 3C-SiC, 4H-SiC и 6H-SiC.



Структурное построение политипных модификаций 3C-SiC (a), 4H-SiC (б) и 6H-SiC (в): *k*, *h* – кубические и гексагональные узлы решетки соответственно; A, B, C – слои кристаллической решетки

Для политипа 3C-SiC последовательностью слоев является ABC, для 4H-SiC – ABCB, для 6H-SiC – ABCACB. Структура других политипных модификаций SiC также отличается расположением слоев и описывается соответствующей последовательностью.

Для микроэлектроники и высоковольтных силовых устройств наибольшее практическое распространение получил политип 4H-SiC за счет высоких значений подвижности электронов и ширины запрещенной зоны [7–10]. Для сравнения в таблице представлены параметры кристаллической решетки, гексагональность в процентном выражении и ширина запрещенной зоны различных политипных модификаций [11, 12]. Следует отметить, что с увеличением размера элементарной ячейки кристалла для H-политипов SiC уменьшается ширина запрещенной зоны.

Параметры политипных модификаций SiC

Параметры	Значения параметров для политипной модификации				
	3C-SiC	6H-SiC	15R-SiC	4H-SiC	2H-SiC
Гексагональность, %	0	33	40	50	100
Параметры кристаллической решетки, Å:					
<i>a</i>	4,3596	3,0730	3,0730	3,0730	3,0730
<i>c</i>	4,3596	15,1100	37,7000	10,0530	5,0480
Ширина запрещенной зоны, эВ	2,3	3,0	3,0	3,2	3,3

Для исследования темной материи предложено использовать детектор на основе SiC из-за сходства его фононных спектров со спектрами фона и нуклона темной материи [13]. В качестве детектора предлагается применять политип 2H-SiC, для которого достигается максимальное значение суточной модуляции сигнала за счет неэквивалентных кристаллографических осей в плоскости и вне ее, что дает анизотропный направленный отклик. Следует отметить, что политип 3C-SiC с высокой симметрией не проявляет суточной модуляции и не пригоден для изготовления такого детектора темной материи.

Одним из активно развивающихся биотехнологических направлений являются получение и использование SiC-квантовых точек для флуоресценции [14] и ДНК-сенсорных технологий [15] благодаря длительной оптической стабильности, нетоксичности и биосовместимости карбида кремния. В частности, после внедрения SiC-квантовых точек размером 2,5 нм в живых клетках наблюдается яркая зеленая флуоресценция на клеточной мембране [16]. Разработаны биосенсоры на базе наночастиц SiC, сопряженных с определенными пептидами, позволяющие быстро обнаружить инфекции при анализе слюны человека [17]. В работе [18] путем объединения SiC-квантовых точек с аптамерами разработан биосенсор для выявления опасных пищевых патогенов с высокой селективностью.

Таким образом, несмотря на многочисленные и давно известные исследования карбида кремния в различных странах, с развитием технологий находят новые области применения этого материала. Это связано с тем, что физические свойства конечного изделия контролируемо меняются в зависимости от используемой политипной модификации SiC и содержания примесей в кристаллической структуре, что в конечном итоге определяет направления развития новых материалов и технологий [19].

Образование кристаллических карбидокремниевых покрытий

Наиболее удобными способами получения кристаллических покрытий являются эпитаксиальное осаждение из газовой фазы и катодное распыление на подложки различной природы [20, 21]. В работе [22] исследована возможность получения из газовой фазы покрытий из SiC. Показано, что скорость формирования покрытия может достигать до 620 мкм/ч при температурах подложки >500 °С. При температуре осаждения 1150 °С содержание свободного кремния в покрытии составляет до 10 % (по массе). По мере увеличения температуры осаждения содержание свободного кремния уменьшается и при высоких температурах (>1500 °С) образуется свободный углерод в покрытии. При сравнении формы кристаллов SiC установлено, что при температурах ~1500 °С образуются иглоподобные кристаллы, при температурах ~1200 °С – гладкая структура. Образование примеси свободного кремния в покрытии также наблюдали в работе [23], при этом уже при температуре осаждения 1100 °С формируется покрытие политипной модификации 3C-SiC без примесей. Кристаллы 3C-SiC представляли собой шестиугольники размером 200–400 нм. В ходе экспериментального исследования по осаждению SiC на гранулы оксида циркония в псевдооживленном слое [24] установлено, что введение газообразного аргона ингибирует выделение свободного кремния в кристаллическом покрытии.

В работе [25] показано, что полученные из метилтрихлорсилана кристаллы расположены на подложке в виде гексагональных игл длиной до 3 мм и шириной 500 мкм и представляют собой политипную модификацию 2H-SiC. Следует отметить, что в основании таких игольчатых кристаллов лежат кристаллы политипа 3C-SiC круглой формы. В работе [26] скорость роста кристаллов политипа 2H-SiC составила 182 мкм/ч при температуре 650 °С. В данном случае исходным сырьем послужил трис(диметиламино)силан, синтез кристаллов проводили в атмосфере метана.

Кристаллические покрытия политипной модификации 3C-SiC получали из газовой смеси, содержащей дихлорсилан, этилен и водород [27]. Скорость осаждения составила 40 мкм/ч при температуре 1350 °С и пониженном давлении. В работе [28]

диаметр кристаллов SiC, осажденных из газовой смеси тетрахлорида кремния и метана, не превышал 100 нм. Скорость осаждения кристаллов SiC в данном исследовании составила 250 мкм/ч при температуре 2020 °С и пониженном давлении.

Для осаждения политипной модификации 3С–SiC в качестве исходного сырья в работе [29] выбрана газовая смесь из метилтрихлорсилана, водорода и аммиака. Аммиак использовали в небольшом количестве с целью допирования кристаллов SiC атомами азота. Рост кристаллического покрытия происходил со скоростью 1,8 мкм/ч при температуре подложки 1040 °С. Следует отметить, что увеличение содержания азота приводит к возрастанию геометрических размеров осаждаемых кристаллов.

В работе [30] осаждение SiC проводили на подложке в виде затравочного кристалла, нагрев которого осуществляли индуктивным током высокой частоты. При поддержании температуры в интервале от 2000 до 2150 °С политипная модификация 6Н–SiC формируется со скоростью ~150 мкм/ч.

Большое внимание политипу 3С–SiC уделяется по причине относительно простого способа его получения в химически и кристаллографически чистом состоянии.

Превращение политипных модификаций SiC

Для понимания сути превращений и причин преимущественного роста того или иного политипа SiC проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования. При рассмотрении зародышеобразования кристаллов политипа 3С–SiC в работе [31] выдвинуто предположение о его предпочтительном образовании на Si-границе в условиях избыточного содержания кремния, тогда как избыток углерода приводит к образованию кристаллов политипа 4Н–SiC на C-границе. В работе [32] образование политипной модификации 4Н–SiC на C-границе связывают с sp^2 -гибридизацией атомов углерода и нарушением изначальной симметрии кристалла. Высказано мнение [33], что политипную модификацию в ходе роста кристаллов SiC предопределяет поверхностная энергия C- и Si-граней на подложке.

Экспериментальные исследования [34] по осаждению покрытий SiC из газовой смеси моносилана (как источника Si) и пропана (как источника C) показали возможность осаждения кристаллов политипной модификации 3С–SiC как на Si-грань, так и на C-грань кристаллической подложки. В других экспериментах [35] установлено, что относительно низкие температуры на подложке и пониженное давление способствуют образованию на C-границе политипной модификации 4Н–SiC. В работе [36] показано, что кристаллы политипа 4Н–SiC формируются при избыточном содержании углерода относительно стехиометрического состава в присутствии примесей таких элементов, как олово, германий, свинец. В диссертации [37] рассмотрено влияние скорости роста и термодинамической стабильности SiC на образование того или иного политипа. Установлено, что самая высокая скорость роста наблюдается для политипа 4Н–SiC, средняя – для 6Н–SiC, а самая низкая – для 3С–SiC.

Выдвинуто предположение о предпочтительном росте политипной модификации 3С–SiC с низкой степенью гексагональности при относительно невысоких температурах по сравнению с другими политипами [38]. Подтверждением данного предположения стали результаты изучения межслоевого взаимодействия кремния и углерода [39], которые показали, что начальная температура формирования политипа 3С–SiC составляет ~700 °С. Другие политипные модификации SiC при данной температуре не обнаружены. Схожие результаты получены в работе [40], в которой отмечена температурная область роста кристаллов SiC от 600 до 700 °С с изменением энтальпии 70 ± 4 кДж/моль. По результатам экспериментов в этой работе сделан вывод, что с наиболее высокой вероятностью кристаллическая структура SiC образуется за счет диффузии кремния в углерод.

На основании того, что при температуре 2300 °С наблюдается превращение гексагонального политипа в кубический политип 3С–SiC, в работе [41] выдвинуто

предположение, что на формирование политипной модификации влияет соотношение C/Si, а не температура роста кристалла на подложке. В работе [42] превращение политипа 4H-SiC в 3C-SiC наблюдали при температурах >1750 °C. Возможность реконструкции на поверхности подложки политипов 6H-SiC и 4H-SiC с последующим формированием политипа 3C-SiC показана также в работе [43].

Помимо экспериментальных исследований превращений политипных модификаций SiC, обсуждаются результаты теоретических расчетов. В частности, с использованием расчетного метода на основе теории функционала плотности изучены морфология и энергетические характеристики процесса образования политипа 3C-SiC [44]. В работе [45] показано, что переход политипной модификации 2H-SiC в 4H-SiC происходит за счет образования метастабильного состояния кристаллической решетки путем наклона связей Si-C.

В работе [46] при изучении термостабильности кристаллической структуры в интервале температур от 1800 до 2400 °C в атмосфере инертного газа установлена температура перехода политипа 3C-SiC в 6H-SiC, которая составляет ~ 2150 °C. Обсуждение стабильности различных политипов SiC в зависимости от температуры представлено в работе [47].

В работе [48] выдвинуто предположение, что на температуру перехода политипа 3C-SiC в 6H-SiC влияет наличие примеси свободного кремния, содержащегося в покрытии SiC. В частности, в данных экспериментах показано образование только политипа 3C-SiC при температуре 2100 °C в случае отсутствия примеси свободного Si в покрытии. При температуре 2300 °C наблюдали снижение содержания в покрытии политипной модификации 3C-SiC до 36 % (по массе) и, соответственно, присутствие других политипов (4H-SiC, 6H-SiC и 15R-SiC). При содержании в карбидокремниевом покрытии свободного Si на уровне ~ 9 % (по массе) при температуре 2300 °C количество политипной модификации 3C-SiC снижается до 24 % (по массе), образуются также кристаллические структуры политипов 4H-SiC, 6H-SiC и 15R-SiC. В работе [49] показано, что добавление алюминия к кристаллическому порошку политипа 3C-SiC при температуре 1900 °C способствует его переходу в политип 4H-SiC на 75 %. Таким образом, четко прослеживается взаимосвязь между температурой превращения политипа 3C-SiC и наличием примесей других элементов в кристаллическом покрытии из SiC.

Комплексное исследование упорядочивания наноструктур политипной модификации кристаллов 3C-SiC с использованием методов фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской дифракции скользящего падения и синхротронного излучения проведено в работе [50]. По результатам исследования установлено, что образование и упорядочивание одномерных наноструктур обусловлены в большей степени поверхностным напряжением. Детальное исследование кристаллической структуры политипа 3C-SiC вывило следующее: при температуре подложки 900 °C образуется смесь разупорядоченных кристаллов политипа 3C-SiC и Si размерами до 20 нм; при 1000 °C – гомогенно распределенные кристаллы политипа 3C-SiC размером до 5 нм; при 1100 °C – столбчатая кристаллическая структура политипа 3C-SiC с сильными искажениями, при этом наблюдается разориентация между кристаллами на уровне 5–10 градусов, а средний размер кристалла составляет 150 нм.

Полученные из 1,3-дисилабутана карбидокремниевые покрытия представляли собой столбчатые кристаллы политипной модификации 3C-SiC с высокой плотностью дефектов упаковки и микродвойников. При этом отмечается, что столбчатые кристаллы возникают не на поверхности подложки, а на буферном слое толщиной от 3 до 5 нм, состоящем из взаимосвязанных островков, возникших при нуклеации. Сделано предположение, что нуклеация происходит на трехмерных пирамидоподобных микрокристаллах, ограниченных медленно растущими плоскостями. Показано, что низкая энергия дефекта упаковки приводит к частому появлению микродвойников, что может влиять

на ориентацию кристалла в пространстве во время роста. Степень кристалличности покрытий из SiC также связывают с тем, что быстро растущие кристаллы одного поли типа не позволяют расти более медленным кристаллам другого поли типа. Это объясняется тем, что выращенные на гранях с ориентацией (111) покрытия из SiC отличаются большей кристалличностью по сравнению с покрытиями на гранях с ориентацией (100).

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Заключения

Представленный анализ научно-технической литературы в области поли типных модификаций карбида кремния в покрытиях кристаллической структуры показывает, что предпочтительное образование того или иного поли типа SiC пытались объяснить с точек зрения термодинамики, кинетики, влияния примесных элементов, соотношения C/Si в исходных реагентах, температуры, присутствия дислокаций и т. д. Несмотря на это, в настоящее время не существует единого мнения и четкого понимания в области механизмов образования разных поли типов карбида кремния.

Работы, направленные на изучение свойств и создание новых направлений практического применения различных поли типов карбида кремния, до сих пор актуальны. Это связано с тем, что физические свойства конечного изделия можно изменять в зависимости от используемой поли типной модификации SiC и содержания примесей в кристаллической структуре.

Список источников

1. Park Y., Weber E. SiC materials and devices. Academic press, 1998. P. 1–18.
2. Сидоров Д.В., Грунин А.А., Шавнев А.А. Реализация технологии химического газофазного осаждения карбида кремния в электронике. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). С. 101–116. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-101-116.
3. Авров Д.В., Лебедев А.О., Таиров Ю.М. Поли типные включения и поли типная стабильность кристаллов карбида кремния // Физика и технология полупроводников. 2016. Т. 50. С. 501–507.
4. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Пути поли типных превращений в карбиде кремния // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. С. 1443–1447.
5. Pensl G., Clobanu F., Frank T. et al. SiC material properties // International Journal of high speed electronics and systems. 2005. Vol. 4. P. 705–745.
6. ElMendili Y., Orberger B., Chateigner D. et al. Insight into the structural, elastic and electronic properties of a new orthorhombic 6O–SiC poly type // Nature. 2020. Vol. 10. P. 7562.
7. Powell A., Rowland L. SiC Materials – progress, status, and potential roadblocks // Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90. P. 942–955.
8. Elasser A., Chow T. Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems // Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90. P. 969–986.
9. Friedrichs P. Silicon carbide power-device products – Status and upcoming challenges with a special attention to traditional, nonmilitary industrial applications // Physica status Solidi. 2008. Vol. 245. P. 1232–1238.
10. Properties of silicon carbide (SiC) // Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе. URL: <http://ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/ebasic.html> (дата обращения: 15.08.2025).
11. Грунин А.А., Сидоров Д.В., Шавнев А.А. Реализация технологии химического газофазного осаждения карбида кремния в электронике. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). С. 92–104. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-92-104.
12. Choyke W., Matsunami H., Pensl G. Silicon carbide: recent major advances. Springer, 2004. 430 p.
13. Griffin M., Hochberg Y., Inzani K. et al. Silicon carbide detectors for sub-GeV dark matter // Physical review D. 2021. Vol. 103. P. 075002.

14. Azar M., Ji Z., Jahanzamin J. Fluorescent Silicon Carbide Quantum Dots // Silicon carbide – materials, devices and emerging applications. IntechOpen, 2024. P. 1–20. DOI: 10.5772/intechopen.1007535.
15. Mamun A., McGarrity M., Kim J. et al. Silicon carbide-based DNA sensing technologies // Micromachines. 2023. Vol. 14. P. 1557–1562.
16. Song Y., Lu Y., Zhang L. et al. Fabrication of silicon carbide quantum dots via chemical-etching approach and fluorescent imaging for living cells // Materials Sciences and Applications. 2014. Vol. 5. P. 177–182.
17. Li X., Zhang Y., Liu Y. et al. Bacteria-targeting BSA-stabilized SiC nanoparticles as a fluorescent nanoprobe for forensic identification of saliva // Microchimica Acta. 2019. Vol. 186. P. 766–773.
18. Yao W., Shi J., Ling J. et al. SiC-functionalized fluorescent aptasensor for determination of *Proteus mirabilis* // Microchimica Acta. 2020. Vol. 187. P. 406–411.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Сидоров Д.В., Шавнев А.А., Мелентьев А.А. Формирование карбидокремниевых покрытий методом химического газофазного осаждения (обзор). Часть 2 // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). С. 88–98. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-88-98.
21. Сидоров Д.В., Шавнев А.А., Мелентьев А.А. Формирование карбидокремниевых покрытий методом химического газофазного осаждения (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2021. № 6 (100). С. 100–111. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-100-111.
22. Chin J., Gantzel P., Hudson R. The structure of chemical vapor deposited silicon carbide // Thin Solid Films. 1977. Vol. 40. P. 57–72.
23. Yang L., Chen Z., Wang B. Chemical vapor deposition of SiC at different molar ratios of hydrogen to methyltrichlorosilane // Journal of central south university of technology. 2009. Vol. 16. P. 0730–0737.
24. Ivashchenko V., Turchi P., Shevchenko V. Simulations of the mechanical properties of crystalline, nanocrystalline, and amorphous SiC and Si // Physical Review B. 2007. Vol. 75. P. 085209.
25. Powell J., Will H. Low-temperature solid-state phase transformations in 2H silicon carbide // Journal of applied physics. 1972. Vol. 43. P. 1400–1408.
26. Ito K., Kanno H., Kawahara T., Goto T. 2H–SiC films grown by laser chemical vapor deposition // Journal of the European ceramic society. 2015. Vol. 35. P. 4611–4615.
27. Hagasawa H., Yagi K., Kawahara T. et al. Hetero- and homo-epitaxial growth of 3C–SiC for MOSFETs // Microelectronic Engineering. 2006. Vol. 83. P. 185–188.
28. Fanton M., Snyder D., Weiland B. et al. Growth of nitrogen-doped SiC boules by halide chemical vapor deposition // Journal of crystal growth. 2006. Vol. 287. P. 359–362.
29. Latha H., Udayakumar A., Prasad V. Microstructure and electrical properties of nitrogen doped 3C–SiC thin films deposited using methyltrichlorosilane // Materials science in semiconductor processing. 2015. Vol. 29. P. 117–123.
30. Nigam S., Chung H., Polyakov F. Growth kinetics study in halide chemical vapor deposition of SiC // Journal of crystal growth. 2005. Vol. 284. P. 112–122.
31. Fissel A. Thermodynamic consideration of the epitaxial growth of SiC polytypes // Journal of crystal growth. 2000. Vol. 212. P. 438–450.
32. Maltsev A., Maksimov A., Yushin N. 4H–SiC single crystal ingots grown on 6H–SiC and 15R–SiC seeds // Institute physical conference series. 1996. Vol. 142. P. 41–44.
33. Stein R., Lanig P. Control of polytype formation by surface anergy effects during the growth of SiC monocrystals by the sublimation method // Journal of crystal growth. 1993. Vol. 131. P. 71–74.
34. Feng Z., Lin H., Xin B. et al. Structural characteristic of 3C–SiC thin films grown on Si-face and C-face 4H–SiC substrates by high temperature chemical vapor deposition // Vacuum. 2023. Vol. 207. P. 111643.
35. Kanaya M., Takanashi J., Fujiwara Y., Moritani A. Controlled sublimation growth of single crystalline 4HSiC and 6HSiC and identification of polytypes by xray diffraction // Applied physics letters. 1991. Vol. 58. P. 56–58.

36. Tairov Y., Tsvetkov V. General principles of growing large-size single crystals of various silicon carbide polytypes // *Journal of Crystal Growth*. 1981. Vol. 52. P. 146–150.
37. Лучинин В.В. Структуро- и формообразование микро- и наносистем на основе широкозонных материалов, обладающих полиморфизмом: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1999. 503 с.
38. Карбид кремния / под ред. Г. Хениша, Р. Роя. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 387 с.
39. Shekhawat D., Sudhahar D., Doll J. et al. Phase formation of cubic silicon carbide from reactive silicon-carbon multilayers // *MRS Advances*. 2023. Vol. 8. P. 494–498.
40. Grieseler R., Gallino I., Duboisakaya N. et al. Silicon carbide formation in reactive silicon-carbon multilayers // *Materials science forum*. 2022. Vol. 1062. P. 44–48.
41. Omori M., Takei H., Fukuda T. Formation of cubic SiC crystals by gas-phase reaction // *Japanese journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 28. P. 1217–1220.
42. Kuebler L., Hershkovitz E., Kouzminov D. et al. 4H to 3C polytypic transformation in Al⁺ implanted SiC during high temperature annealing // *Electronic materials letters*. 2023. Vol. 20. P. 345–351.
43. Heinz K., Bernhardt J., Schardt J., Starke U. et al. Functional surface reconstructions of hexagonal SiC // *Journal of physics: Condensed matter*. 2004. Vol. 16. P. 1705.
44. Seino K., Oshiyama A. Energetics of the surface step and its morphology on the 3C-SiC(111) surface clarified by the density-functional theory // *Applied physics express*. 2020. Vol. 13. P. 012206.
45. Кукушкин С.А., Осипов А.В. Микроскопическое описание механизма перехода между поли типами 2H и 4H карбида кремния // *Физика твердого тела*. 2019. Т. 61. С. 422–425.
46. Yoo S., Matsunami H. Solid-state phase transformation in cubic silicon carbide // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1991. Vol. 30. P. 545–549.
47. Jepps N., Page T. Polytypic transformation in silicon carbide // *Progress in crystal growth and characterization*. 1983. Vol. 7. P. 259–307.
48. Jayakumari S., Tangstad M. Transformation of β -SiC from charcoal, coal, and petroleum coke to α -SiC at higher temperatures // *Metallurgical and materials transaction B*. 2020. Vol. 51. P. 2673–2688.
49. Moberlychan W., Cao J., Gilbert C. et al. The cubic-to-hexagonal transformation to toughen SiC // *Ceramic microstructure: control at the atomic level*. New York: Plenum press, 1998. P. 177–190.
50. Soukiassian P., Enriquez H. Atomic scale control and understanding of cubic silicon carbide surface reconstructions, nanostructures and nanochemistry // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2004. Vol. 16. P. 1611–1658.

References

1. Park Y., Weber E. *SiC materials and devices*. Academic press, 1998, pp. 1–18.
2. Sidorov D.V., Grunin A.A., Schavnev A.A. Implementation of technology for chemical vapor deposition of silicon carbide in electronics. Part 1. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), pp. 101–116. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-101-116.
3. Avrov D.V., Lebedev A.O., Tairov Yu.M. Polytypic inclusions and polytypic stability of silicon carbide crystals. *Fizika i tekhnologiya poluprovodnikov*, 2016, vol. 50, pp. 501–507.
4. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Paths of polytypic transformations in silicon carbide. *Fizika tverdogo tela*, 2019, vol. 61, pp. 1443–1447.
5. Pensl G., Clobanu F., Frank T. et al. SiC material properties. *International Journal of high speed electronics and systems*, 2005, vol. 4, pp. 705–745.
6. ElMendili Y., Orberger B., Chateigner D. et al. Insight into the structural, elastic and electronic properties of a new orthorhombic 6O-SiC polytype. *Nature*, 2020, vol. 10, p. 7562.
7. Powell A., Rowland L. SiC Materials – progress, status, and potential roadblocks. *Proceedings of the IEEE*, 2002, vol. 90, pp. 942–955.
8. Elasser A., Chow T. Silicon carbide benefits and advantages for power electronics circuits and systems. *Proceedings of the IEEE*, 2002, vol. 90, p. 969–986.
9. Friedrichs P. Silicon carbide power-device products – Status and upcoming challenges with a special attention to traditional, nonmilitary industrial applications. *Physica status Solidi*, 2008, vol. 245, pp. 1232–1238.
10. *Properties of silicon carbide (SiC)*. Available at: <http://ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/ebasic.html> (accessed: August 15, 2025).

11. Grunin A.A., Sidorov D.V., Schavnev A.A. Implementation of technology for chemical vapor deposition of silicon carbide in electronics. Part 2. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), pp. 92–104. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-92-104.
12. Choyke W., Matsunami H., Pensl G. *Silicon carbide: recent major advances*. Springer, 2004, 430 p.
13. Griffin M., Hochberg Y., Inzani K. et al. Silicon carbide detectors for sub-GeV dark matter. *Physical review D*, 2021, vol. 103, p. 075002.
14. Azar M., Ji Z., Jahanzamin J. Fluorescent Silicon Carbide Quantum Dots. *Silicon carbide – materials, devices and emerging applications*. IntechOpen, 2024, pp. 1–20. DOI: 10.5772/intechopen.1007535.
15. Mamun A., McGarrity M., Kim J. et al. Silicon carbide-based DNA sensing technologies. *Micromachines*, 2023, vol. 14, pp. 1557–1562.
16. Song Y., Lu Y., Zhang L. et al. Fabrication of silicon carbide quantum dots via chemical-etching approach and fluorescent imaging for living cells. *Materials Sciences and Applications*, 2014, vol. 5, pp. 177–182.
17. Li X., Zhang Y., Liu Y. et al. Bacteria-targeting BSA-stabilized SiC nanoparticles as a fluorescent nanoprobe for forensic identification of saliva. *Microchimica Acta*, 2019, vol. 186, pp. 766–773.
18. Yao W., Shi J., Ling J. et al. SiC-functionalized fluorescent aptasensor for determination of *Proteus mirabilis*. *Microchimica Acta*, 2020, vol. 187, pp. 406–411.
19. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Sidorov D.V., Schavnev A.A., Melentev A.A. Formation of silicon carbide coatings by chemical vapor deposition (review). Part 2. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), pp. 88–98. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 19, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-88-98.
21. Sidorov D.V., Schavnev A.A., Melentev A.A. Formation of silicon carbide coatings by chemical vapor deposition (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2021, no. 6 (100), pp. 100–111. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 19.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-100-111.
22. Chin J., Gantzel P., Hudson R. The structure of chemical vapor deposited silicon carbide. *Thin Solid Films*, 1977, vol. 40, pp. 57–72.
23. Yang L., Chen Z., Wang B. Chemical vapor deposition of SiC at different molar ratios of hydrogen to methyltrichlorosilane. *Journal of central south university of technology*, 2009, vol. 16, pp. 0730–0737.
24. Ivashchenko V., Turchi P., Shevchenko V. Simulations of the mechanical properties of crystalline, nanocrystalline, and amorphous SiC and Si. *Physical Review B*, 2007, vol. 75, p. 085209.
25. Powell J., Will H. Low-temperature solid-state phase transformations in 2H silicon carbide. *Journal of applied physics*, 1972, vol. 43, pp. 1400–1408.
26. Ito K., Kanno H., Kawahara T., Goto T. 2H–SiC films grown by laser chemical vapor deposition. *Journal of the European ceramic society*, 2015, vol. 35, pp. 4611–4615.
27. Hagasawa H., Yagi K., Kawahara T. et al. Hetero- and homo-epitaxial growth of 3C–SiC for MOSFETs. *Microelectronic Engineering*, 2006, vol. 83, pp. 185–188.
28. Fanton M., Snyder D., Weiland B. et al. Growth of nitrogen-doped SiC boules by halide chemical vapor deposition. *Journal of crystal growth*, 2006, vol. 287, pp. 359–362.
29. Latha H., Udayakumar A., Prasad V. Microstructure and electrical properties of nitrogen doped 3C–SiC thin films deposited using methyltrichlorosilane. *Materials science in semiconductor processing*, 2015, vol. 29, pp. 117–123.
30. Nigam S., Chung H., Polyakov F. Growth kinetics study in halide chemical vapor deposition of SiC. *Journal of crystal growth*, 2005, vol. 284, pp. 112–122.
31. Fissel A. Thermodynamic consideration of the epitaxial growth of SiC polytypes. *Journal of crystal growth*, 2000, vol. 212, pp. 438–450.
32. Maltsev A., Maksimov A., Yushin N. 4H–SiC single crystal ingots grown on 6H–SiC and 15R–SiC seeds. *Institute physical conference series*, 1996, vol. 142, pp. 41–44.

33. Stein R., Lanig P. Control of polytype formation by surface anergy effects during the growth of SiC monocrystals by the sublimation method. *Journal of crystal growth*, 1993, vol. 131, pp. 71–74.
34. Feng Z., Lin H., Xin B. et al. Structural characteristic of 3C–SiC thin films grown on Si-face and C-face 4H–SiC substrates by high temperature chemical vapor deposition. *Vacuum*, 2023, vol. 207, p. 111643.
35. Kanaya M., Takanashi J., Fujiwara Y., Moritani A. Controlled sublimation growth of single crystalline 4HSiC and 6HSiC and identification of polytypes by xray diffraction. *Applied physics letters*, 1991, vol. 58, pp. 56–58.
36. Tairov Y., Tsvetkov V. General principles of growing large-size single crystals of various silicon carbide polytypes. *Journal of Crystal Growth*, 1981, vol. 52, pp. 146–150.
37. Luchinin V.V. *Structure and formation of micro- and nanosystems based on wide-band-gap materials possessing polymorphism*: thesis, Dr Sc. (Tech.). St. Petersburg, 1999, 503 p.
38. *Silicon Carbide*. Ed. G. Henisz, R. Roy. Trans. from English. Moscow: Mir, 1972, 387 p.
39. Shekhawat D., Sudhahar D., Doll J. et al. Phase formation of cubic silicon carbide from reactive silicon–carbon multilayers. *MRS Advances*, 2023, vol. 8, pp. 494–498.
40. Grieseler R., Gallino I., Duboisakaya N. et al. Silicon carbide formation in reactive silicon-carbon multilayers. *Materials science forum*, 2022, vol. 1062, pp. 44–48.
41. Omori M., Takei H., Fukuda T. Formation of cubic SiC crystals by gas-phase reaction. *Japanese journal of Applied Physics*, 1989, vol. 28, pp. 1217–1220.
42. Kuebler L., Hershkovitz E., Kouzminov D. et al. 4H to 3C polytypic transformation in Al⁺ implanted SiC during high temperature annealing. *Electronic materials letters*, 2023, vol. 20, pp. 345–351.
43. Heinz K., Bernhardt J., Schardt J., Starke U. et al. Functional surface reconstructions of hexagonal SiC. *Journal of physics: Condensed matter*, 2004, vol. 16, p. 1705.
44. Seino K., Oshiyama A. Energetics of the surface step and its morphology on the 3C–SiC(111) surface clarified by the density-functional theory. *Applied physics express*, 2020, vol. 13, p. 012206.
45. Kukushkin S.A., Osipov A.V. Microscopic description of the mechanism of transition between 2H and 4H polytypes of silicon carbide. *Fizika tverdogo tela*, 2019, vol. 61, pp. 422–425.
46. Yoo S., Matsunami H. Solid-state phase transformation in cubic silicon carbide. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 30, pp. 545–549.
47. Jepps N., Page T. Polytypic transformation in silicon carbide. *Progress in crystal growth and characterization*, 1983, vol. 7, pp. 259–307.
48. Jayakumari S., Tangstad M. Transformation of β-SiC from charcoal, coal, and petroleum coke to α-SiC at higher temperatures. *Metallurgical and materials transaction B*, 2020, vol. 51, pp. 2673–2688.
49. Moberlychan W., Cao J., Gilbert C. et al. The cubic-to-hexagonal transformation to toughen SiC. *Ceramic microstructure: control at the atomic level*. New York: Plenum press, 1998, pp. 177–190.
50. Soukiassian P., Enriquez H. Atomic scale control and understanding of cubic silicon carbide surface reconstructions, nanostructures and nanochemistry. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2004, vol. 16, pp. 1611–1658.

Информация об авторах

Сидоров Денис Викторович, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Denis V. Sidorov, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Shavnev, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 20.11.2025; получена после доработки 19.01.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.01.2026.
The article was submitted 20.11.2025; received in revised form 19.01.2026; approved and accepted for publication after reviewing 28.01.2026.