

## Изучение эпитаксиального соответствия карбида кремния на кремнии

*В.К. Егоров, \*Е.В. Егоров, \*\*С.А. Кукушкин, \*\*А.В. Осипов*  
*ИПТМ РАН, Черноголовка, Московская область, 142432 Россия, [egorov@iptm.ru](mailto:egorov@iptm.ru)*  
*\*РУДН, Москва, Россия*  
*\*\*ИПМ РАН, Санкт-Петербург, Россия*

*В работе дана краткая характеристика метода каналирования ионов в материале, позволяющего однозначно интерпретировать наличие/отсутствие структурной гетероэпитаксии. Описаны структурные особенности кристаллического строения Si и SiC. Приведены экспериментальные данные, доказывающие наличие гетероэпитаксии в структурной композиции SiC (001)/Si (111) для пленки политипа карбида кремния 6H толщиной 100 нм.*

*Study of silicon carbide epitaxy on silicon substrate. V.K. Egorov, E.V. Egorov, S.A. Kukushkin, A.V. Osipov. The work presents a short description of the ion beam channeling method for material diagnostics. It makes possible to explain the presence / absence of structure heteroepitaxy. Peculiarities of Si and SiC crystal construction are discussed. Experimental data are presented proving the heteroepitaxy existence in SiC (001)/Si (111) structural composition when the carbon silicide coating has 6H polytype modification with the thickness 100 nm.*

### ВВЕДЕНИЕ

Главной отличительной чертой монокристаллического строения материала является наличие строго упорядоченного расположения атомов в их кристаллографических позициях, соответствующего группе симметрии его кристаллической решетки, с жестко фиксированными расстояниями между центрами атомов. В этих центрах сосредоточена масса атомов, в основном определяемая массой их ядер, и положительный заряд, соответствующий их атомному номеру. Наличие строгого упорядочения позволяет рассматривать монокристаллический материал как совокупность атомных цепочек, ориентированных вдоль главных кристаллографических направлений в кристалле. Поскольку диаметр ядер значительно меньше атомных размеров, потенциал между атомными цепочками может быть представлен функцией, по форме близкой к английской букве джу (u) [1]. При попадании в такую потенциальную яму быстрые ионы начинают двигаться по осциллирующим траекториям (рис. 1). Такой тип движения ионов в кристаллическом материале принято называть осевым каналированием ионного потока [2]. Он характеризуется более глубоким проникновением потока ионов в объем материала, с которым он взаимодействует, в сравнении с глубиной, на которую он проникает в случайно ориентированный монокристалл.

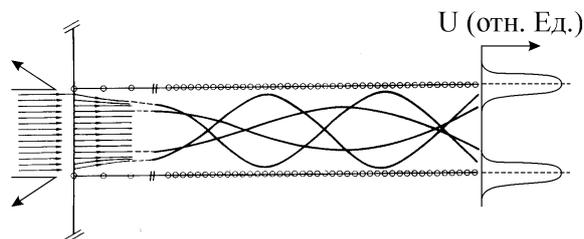


Рис. 1. Модель осцилляционного распространения потока высокоэнергетических ионов в пространстве между цепочками упорядоченно расположенных ядер атомов и функция потенциала в этом пространстве.

Монокристаллическое строение материала может быть представлено не только в форме упорядоченного расположения атомных цепочек, но и атомных плоскостей. При ориентированном попадании ионного потока в межплоскостные области кристалла также наблюдается каналирование, которое принято называть плоскостным. В сравнении с осевым, плоскостное каналирование ионов является менее ярким эффектом и используется в экспериментальных исследованиях лишь для решения узко специализированных задач [3].

В экспериментальном плане явление каналирования ионов в монокристаллах приводит к резкому снижению интенсивности выхода их рассеяния на ядрах атомов зондируемого материала. Этот эффект достаточно точно описывается формулой Резерфорда, предполагающей упругое взаимодействие положительно заряженного иона, налетающего на положительно заряженное покоящееся ядро атома [4]. Такой подход годится для описания взаимодействия ионных пучков средних энергий ( $E_0=0.5-2.5$  МэВ) в предположении статистически распределенных атомов по объему тестируемого материала, т.е. для монокристаллов при их случайной ориентации относительно направления распространения ионного потока. С учетом атомной плотности материалов резерфордовский подход позволяет адекватно описывать эффект взаимодействия ионного потока с веществом [5]. В случае наличия ориентационного соответствия между направлением распространением ионного потока и одной из главных кристаллографических осей исследуемого монокристалла, наблюдается существенное уменьшение эффективности рассеяния этого потока за счет захвата части ионов в осевые кристаллические каналы. На рисунке 2 приведен пример, наглядно иллюстрирующий такое изменение. На нем показаны спектры резерфордовского обратного рассеяния (РОР) потока ионов гелия на ядрах атомов монокристалла кремния, полученные в условиях его случайной ориентации относительно направления потока распространения ионов, и при их осевом каналировании вдоль кристаллографического направления [100]. Спектры демонстрируют реальное уменьшение выхода рассеяния ионов в условиях осевого каналирования более чем в 20 раз. При осевом каналировании глубина проникновения ионов внутрь кристалла увеличивается в 3-5 раз вследствие уменьшения тормозных потерь. Такое уменьшение является отражением снижения степени взаимодействия с электронами внутренних оболочек атомов. Поэтому в условиях каналирования помимо уменьшения выхода рассеяния ионов снижается и выход рентгеновской флуоресценции, вызываемой ионным возбуждением. Но одновременно увеличивается выход ионolumинесценции, обусловленной взаимодействием с внешними электронами [6].

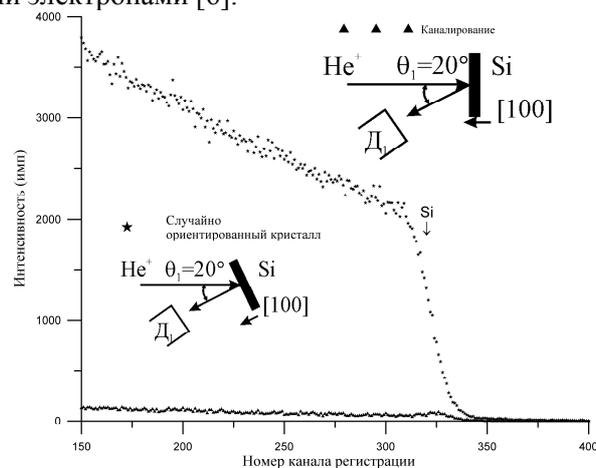


Рис. 2. Экспериментальные спектры РОР потока ионов  $He^+$  ( $E_0=1.22$  МэВ), полученные для монокристалла Si в его случайной ориентации относительно направления распространения ионов (\*) и в условиях каналирования ионного потока вдоль кристаллографической оси [100]. Стрелкой отмечена энергия, соответствующая рассеянию на ядрах поверхностных атомов. Энергетический шаг 1.9 кэВ/канал.

Явление каналирования сопровождается и целым рядом других интересных эффектов [7], но его главной особенностью является возможность непосредственно отличать наличие монокристалличности (или гетероэпитаксии) от высококачественного текстурирования. В рентгенодифракционном анализе материалов принято, что для установления монокристалличности материала или наличия эпитаксии в гетерокомposite необходимо и достаточно регистрации в специальной геометрии отражений общего вида (hkl) [8]. Однако наши последние исследования гетероструктуры Au/мусковит убедительно показали, что наличие рефлексов общего положения не является достаточным фактором, доказывающим полное ориентационное соответствие пленочной и подложечной структуры [9]. Реальным фактором, доказывающим наличие гетероэпитаксии в гетерокомposite структурах представляется наблюдение в них осево-

го каналирования ионных потоков. Возможность каналирования ионов – это прямое следствие наличия ориентационного соответствия между сопрягаемыми кристаллическими структурами по всем трем кристаллографическим осям. Поэтому в данной работе для исследования возможного ориентационного согласия гексагональной структуры SiC и кубической структуры кремния помимо дифрактометрических исследований был выполнен анализ экспериментальных гетероструктур SiC/Si с помощью каналирования потоков ионов гелия и водорода. Для этих исследований были использованы аналитические возможности ионно-пучкового комплекса Сокол-3 [10].

### **МЕТОД ТВЕРДОФАЗНОГО НАРАЩИВАНИЯ ПЛЕНКИ SiC НА КРЕМНИИ**

Разработка технологий получения монокристаллических пленок карбида кремния с совершенной кристаллической структурой на кремниевых подложках представляется весьма актуальным направлением развития нанoeлектроники и фотоники. В настоящее время развита технология выращивания монокристаллов карбида кремния и освоено производство подложечного материала на базе этого соединения [11]. Однако стоимость подобных пластин крайне высока и их использование плохо сочетается с кремниевой технологией. Поэтому, несмотря на существенные структурные и термические различия кремния и его карбида (Si характеризуется кубической решеткой типа алмаз  $a=0.357$  нм; SiC кристаллизуется с образованием нескольких политипов с гексагональной структурой 2H, 4H, 6H и с кубической решеткой  $a=0.357$  нм [12]) предпринимались попытки получения пленок SiC на кремнии [13]. При этом основное внимание акцентировалось на разработке типа буферной зоны между пленкой и подложкой, которая позволила бы обеспечить ориентационное соответствие между ними и минимальную дефектность кремний-карбидного покрытия. Исследования показали, что природа позволяет получить буферную зону с необходимыми свойствами на основе использования метода твердофазной эпитаксии с применением газообразных компонентов [14-16]. Основанием разработки этого метода явились экспериментальные данные о высокой диффузионной подвижности молекул CO и SiO в кристаллической структуре карбида кремния [17,18]. Технически метод реализуется помещением монокристаллической кремниевой подложки выбранной ориентации в газовую среду монооксида углерода и подбора давления газа и температуры нагрева кремния. При определенных условиях между кремнием и моноокисью углерода происходит химическая реакция с образованием конденсированных молекул карбида кремния и газообразных молекул монооксида кремния. При этом существенно, что в конденсированном состоянии одна молекула SiC заменяет два атома кремния, т.е. в области протекания твердофазной реакции появляются структурные вакансии. Возникновение вакансий позволяет существенно снизить значения упругих напряжений, связанных с различием размеров элементарных ячеек кремния и его карбида, а также унаследовать ориентационную зависимость структуры появляющейся карбидной фазы от исходной кремниевой материнской структуры. Эксперименты показали, что при температуре 1300°C может быть получена гетероструктура SiC/Si с толщиной покрытия около 100 нм.

Важной технологической особенностью метода твердофазной эпитаксии с участием газовой составляющей является тот факт, что структурные вакансии, возникающие в кремнии в ходе химической реакции, оказываются не связанными с кристаллической решеткой кремний-карбидной пленки, а сосредотачиваются под покрытием, тем самым образуя буферную зону пористого кремни между структурой подложки и пленки. Эта зона с одной стороны, сохраняет ориентационные свойства гетероструктуры, а с другой – позволяет компенсировать различие в коэффициентах термического расширения кремния и его карбида.

Модель технологического метода твердофазной эпитаксии с участием газовой фазы и предварительные измерения [15,16,19] дали основание предполагать, что получаемые гетероструктуры характеризуются действительным эпитаксиальным соответствием пленок карбида кремния и кремниевых подложек. Поскольку однозначный ответ на этот вопрос может быть получен только с использованием каналирования ионов в гетероструктурах, в работе проведено исследование гетероструктур данного типа с использованием ионно-пучкового комплекса Сокол-3 (УНУ №45) [20] совместно с их дифрактометрическим изучением.

### **ИОННО-ПУЧКОВЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СОКОЛ-3**

Основным узлом ионно-пучкового аналитического комплекса Сокол-3 является электростатический генератор Ван де Граафа – ЭСУ-2, который позволяет генерировать поток ио-

нов  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  в энергетическом интервале 0.05-2.00 мегаэлектронвольта с разбросом энергии в пучке 0.1-0.3 килоэлектронвольта.

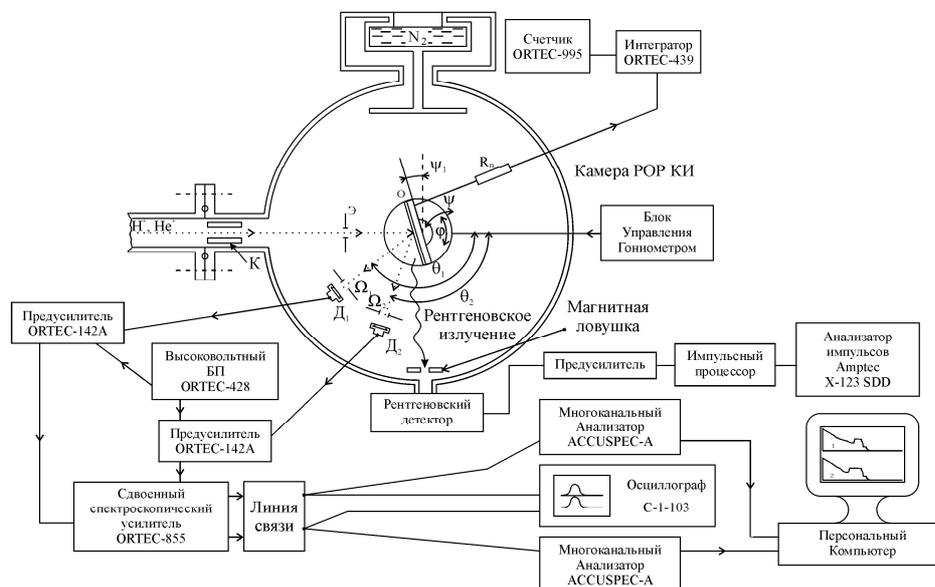


Рис. 3. Схема расположения гониометра с образцедержателем, детекторов рассеянных ионов и регистратора выхода рентгеновской флуоресценции в камере POP ионно-пучкового комплекса Сокол-3 и электронных систем внешней записи сигналов.

Аналитическая камера комплекса, схема которой показана на рисунке 3, оснащена гониометром, который имеет две угловые и одну поступательную степени свободы, и системой ионколлимирующих устройств. В камере предусмотрена возможность фиксации величины ионного тока пучка, рассеянного образцом, имеется двухдетекторная система параллельной регистрации выхода рассеяния ионов для двух различных угловых направлений. Камера располагает детектором выхода характеристической рентгеновской флуоресценции, инициированной ионными пучками. Вакуум в измерительной камере обеспечивается тандемом турбомолекулярного и магниторазрядного насосов на уровне  $1 \cdot 10^{-6}$  торр ( $7 \cdot 10^{-3}$  Па).

Камера используется для реализации всего комплекса ионно-пучковых аналитических методов элементной диагностики материалов. Все ионно-пучковые диагностические методы являются неdestructивными [5,7]. Базовым методом диагностики является резерфордовское обратное рассеяние (РОР). При этом в условиях рассеяния потоков ионов водорода необходимо иметь в виду существенное значение нерезерфордовского вклада в величину выхода рассеяния, которое особенно существенно при диагностике легких элементов [21]. Главной особенностью РОР измерений является его абсолютность, т.е. отсутствие необходимости использования стандартов и эталонов. Метод многоэлементен и позволяет получать концентрационные профили по толщине исследуемой мишени для элементов от Li до U с разрешением по глубине вплоть до 2 нанометров. Метод РФА при ионном возбуждении, также реализованный в рамках установки Сокол-3, позволяет фиксировать наличие примесных элементов в исследуемых пробах для всех элементов начиная со фтора на уровнях  $10^{-6}$ - $10^{-9}$ % ат. (в зависимости от типа примеси). Кроме того, на установке Сокол-3 возможна диагностика концентрационного профиля содержащая водород методом ядерной отдачи [22], а также анализ наличия изотопов различных атомов в материалах методом ядерных реакций [23].

### **ИЗУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ СТРУКТУРНОГО ПОЛИТИПА 6H**

Карбид кремния способен кристаллизоваться в целом ряде структурных модификаций, называемых политипами [24]. Среди них наиболее часто встречающимися являются 2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC и 3C-SiC. Первые три модификации относятся к гексагональным политипам, а

последний является кубической структурой. Все кристаллографические модификации карбида кремния кристаллизуются в соответствии с законом сферической плотной упаковки (рис. 4а). Поскольку размер атомов кремния существенно превосходит диаметр атомов углерода, плотноупакованными структурными элементами оказываются атомы Si. В зависимости от типа последовательности слоев результирующая структура может характеризоваться кубической или гексагональной симметрией. Гексагональный политип 6H, который является наиболее распространенным, характеризуется последовательностью плотноупакованных слоев атомов кремния ABCACB... Проекция этого политипа в направлении [1120] показана на рисунке 3б. Такую структуру принято называть «вюрцитоподобной», в которой атомы углерода занимают половину образованных плотной упаковкой атомов Si тетраэдрических пустот. Данный политип характеризуется размерами кристаллической решетки  $a=0.308$  нм,  $c=1.512$  нм. Карбид кремния имеет плотность  $3.21$  г/см<sup>3</sup>. 6H политип является высокотемпературной структурной модификацией, стабильной при  $t>1700^\circ\text{C}$ . При быстром охлаждении политип сохраняет свои структурные особенности [24]. Монокристаллы этой структурной модификации размером порядка  $10\times 10\times 1$  мм<sup>3</sup> могут быть легко приготовлены методом Лели [25]. Выращенные этим методом кристаллы имели форму тонких пластин площадью около  $1$  см<sup>2</sup> толщиной  $1$  мм и характеризовались слабой зеленой окраской. Плоскости пластин имели ориентацию (001).

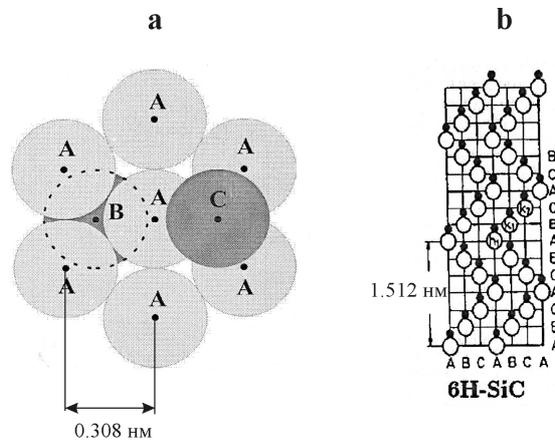


Рис. 4. Схематическое расположение атомов Si и C в структуре политипа 6H-SiC в проекции [1120] (б) и проекции [0001] (а). A, B, C – плоскости плотнейшей упаковки, образованные атомами кремния.

На рисунке 5 приведен фрагмент дифрактограммы, полученной в фокусирующей геометрии Брега-Брентано на дифрактометре HZG-4, монокристаллической пластины 6H-SiC, приготовленной классическим методом Лели. Помимо основного структурного пика  $d_{006}=0.253$  нм ( $\theta K\alpha=8.08^\circ$ ), на дифрактограмме отчетливо наблюдается сверхструктурный максимум  $d_{001}=1.52$  нм ( $\theta K\alpha=1.68^\circ$ ), что является прямым доказательством наличия политипного упорядочения типа 6H. Дифрактометрические измерения данного образца в условиях «косых» съемок (т.е. в условиях вывода поверхности образца из отражающего положения) показали, что данный образец характеризуется дифрактометрическими отражениями общего положения, что позволяет предполагать, что данный объект может являться монокристаллом.

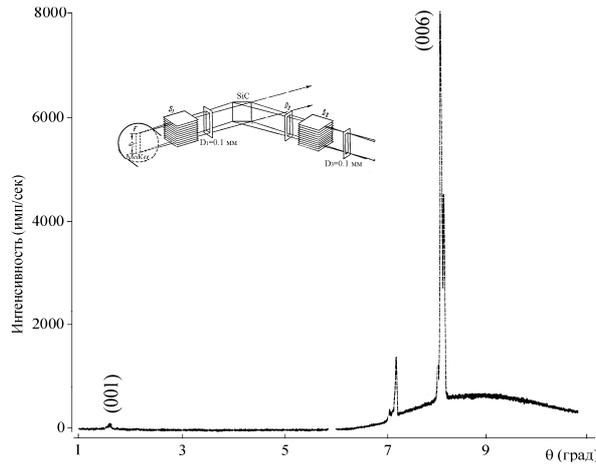


Рис. 5. Фрагмент дифрактограммы кристаллической пластины SiC, имеющей предпочтительную ориентацию [001] перпендикулярно плоскости пластины. Наличие рефлекса (001) позволяет утверждать, что пластина характеризуется политипией типа 6H. Дифрактометрия выполнена с использованием излучения MoK $\alpha$ .

На рис. 6 представлены спектры РОР потоков ионов гелия и водорода на пластине 6H-SiC, приготовленной классическим методом Лели, полученные в условиях случайной ориентации пластины относительно направления распространения ионных потоков и в ориентированном положении. В ориентированном положении наглядно наблюдается эффект осевого каналирования ионных потоков в структуре карбидо-кремниевой пластины, доказывает ее монокристалличность. Рентгенофлуоресцентный анализ в условиях полного внешнего отражения (РФА ПВО) показал наличие в структуре карбида кремния до 1% ат. атомов Ca, Fe и Cu, суммарно.

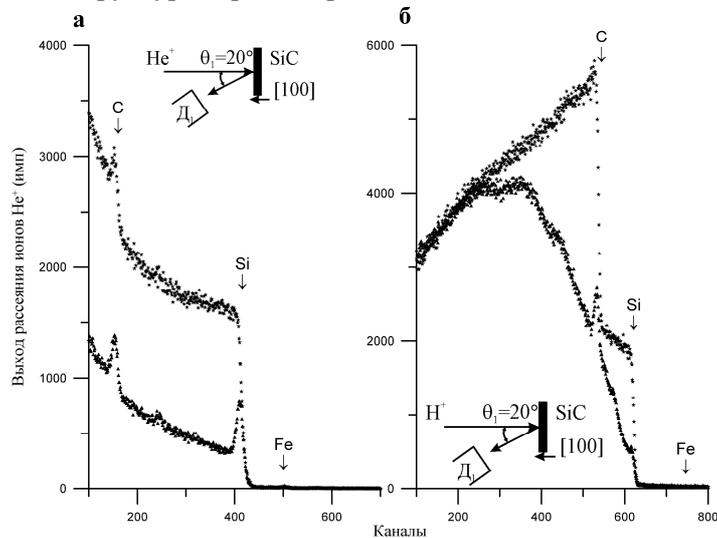


Рис. 6. Спектры РОР, ионов He<sup>+</sup> ( $E_0=1.575$  МэВ) (а) и H<sup>+</sup> ( $E_0=1.526$  МэВ) (б) полученные в условиях каналирования ( $\Delta$ ) и случайной ориентации (\*) монокристалла 6H-SiC, приготовленного методом Лели. Острые пики, наблюдаемые на спектрах каналирования, соответствуют рассеянию на ядрах атомов Si и C, находящихся на поверхности кристалла. Энергетический шаг 1.9 кэВ/канал.

Полезной особенностью наблюдения эффекта каналирования потока ионов водорода в монокристаллах является возможность оценить глубину, на которой эффект каналирования прекращается. Физическая причина деканалирования ионного потока на некоторой глубине материала связана с тем, что по ходу его движения у ионов появляется перпендикулярная составляющая скорости, и по мере углубления потока в объем материала количество ионов, дви-

гающихся вдоль каналов, сокращается. Расчеты показывают, что в материале 6H-SiC имеющего структурного качества для потока ионов водорода с энергией  $E_0=1.526$  МэВ глубина деканалирования составляет 4.5 микронметра.

### ИЗУЧЕНИЕ ЭПИТАКСИАЛЬНОСТИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ SiC/Si

Изучение гетероструктур SiC/Si (111), получаемых методом твердофазного синтеза, было начато с их дифрактометрии. На рис. 7 показан фрагмент дифрактограммы одной из таких гетероструктур, полученной с использованием источника излучения БСВ-27 (Cu) в фокусирующей геометрии Брега-Брентано. На рентгенограмме представлены интенсивные рефлексы Si (111)  $\alpha$  и Si (111)  $\beta$  линий, характеризующие ориентацию структуры подложки кристаллографической осью [111] перпендикулярно поверхности гетероструктуры. Там же наблюдаются пики SiC (006)  $\alpha$ , SiC (006)  $\beta$ , также показывающие ориентацию пленочной структуры карбида кремния своей гексагональной осью перпендикулярно плоской поверхности гетероструктуры. Такое соответствие может наблюдаться как при наличии эпитаксии, так и в условиях образования текстуры [9]. При этом существенно отметить, что плоскость (111) кремниевой структуры характеризуется сеткой плотной упаковки с межатомным расстоянием 0.384 нм, а аналогичная сетка плотной упаковки атомов Si в плоскости (001) структуры 6H-SiC – 0.308 нм. При столь значительной разнице в межатомном расстоянии прямое эпитаксиальное сращивание пленочной и подложечной структур практически невозможно [26]. Именно по этой причине технология твердофазной эпитаксии, кратко изложенная выше, предполагала создание буферной зоны между сложно соизмеримыми структурами пленки и подложки [27].

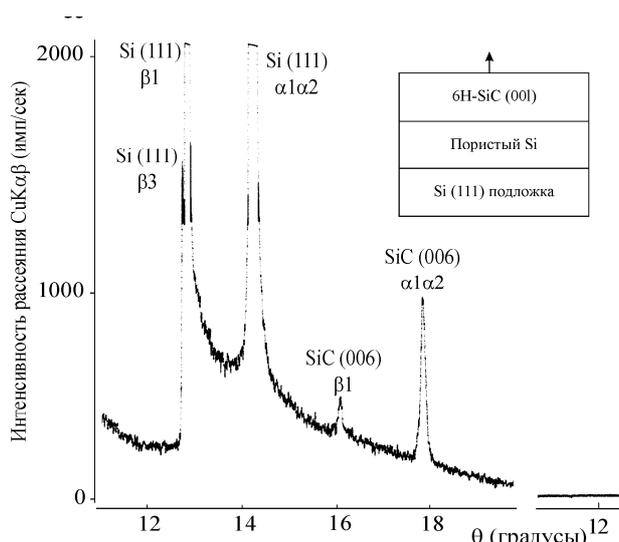


Рис. 7. Фрагменты дифрактограммы гетероструктуры 6H-SiC (001)/Si (111), полученные в фокусирующей геометрии Брега-Брентано, позволяющие утверждать наличие осевого соответствия между кристаллографическим направлением подложки [111] и гексагональной осью пленки 6H-SiC, графически показанного на врезке.

В качестве первой задачи ионно-пучковой диагностики SiC/Si гетероструктур рассматривался анализ распределения элементов по их толщине, который позволяет аналитически реконструировать результаты технологического процесса. На рисунке 8 представлены экспериментальные спектры РОР ионных пучков гелия (а) и водорода (б), полученные для гетероструктуры 6H-SiC/Si, и теоретические огибающие, которые позволяют аппроксимировать элементный концентрационный профиль по ее толщине.

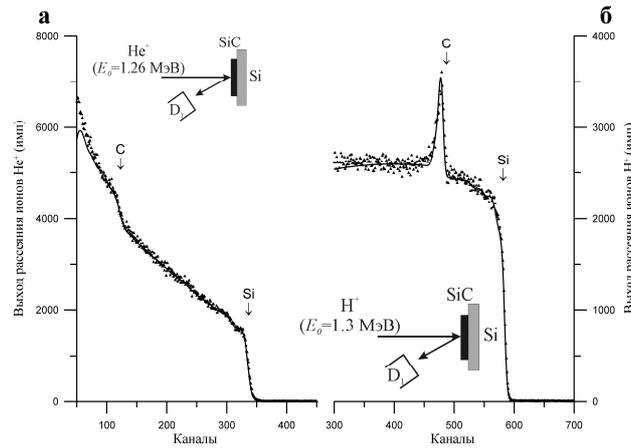


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические спектры POP потоков ионов  $He^+$  ( $E_0=1.26$  МэВ) (а) и  $H^+$  ( $E_0=1.3$  МэВ) (б) для гетероструктуры  $6H-SiC/Si$ , полученные в условиях случайной ориентации мишени относительно направления распространения ионных потоков. Энергетический шаг 1.9 кэВ/канал.

Аппроксимация спектров, показанных на рисунке 8, вместе со спектрами, зарегистрированными вторым детектором, установленным под углом к направлению распространения ионных потоков  $120^\circ$ , проводилась с помощью пакета программ RUMPP, который является результатом выполненной нами модификации аппроксимационной интерактивной программы RUMP [28]. Результаты аппроксимации представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты аппроксимации комплекта спектров POP ионов  $He^+$  и  $H^+$ , полученных для гетероструктуры  $6H-SiC/Si$  приготовленной методом твердофазной эпитаксии с использованием газовой фазы при температуре  $1300^\circ C$ .

№	Состав, усредненный по толщине слоя	Толщина, нм	Примечание
1	$Si_1C_1$	$75 \pm 5$	Гомогенен по толщине
2	$Si_1C_{0.6}$	$45 \pm 6$	Наблюдается вариация состава
3	$0.85Si_{0.75} \square_{0.25} + 0.15Si_1C_1$	$100 \pm 10$	Не гомогенен
4	$0.9Si_{0.8} \square_{0.2} + 0.1Si_1C_1$	$100 \pm 10$	Не гомогенен
5	$0.95Si_{0.9} \square_{0.1} + 0.05Si_1C_1$	$100 \pm 10$	Не гомогенен
6	$Si_{0.94} \square_{0.06}$	$500 \pm 50$	Не гомогенен
7	$Si_{0.98} \square_{0.02}$	$500 \pm 50$	Не гомогенен
8	$Si_1$	$0.5 \cdot 10^6$	Подложка

Следующей задачей ионно-пучковой диагностики гетероструктуры  $6H-SiC/Si$  являлось экспериментальное установление факта наличия-отсутствия структурной эпитаксии. Для решения этой задачи были проведены поиски условий возможного каналирования потоков ионов гелия и водорода вдоль оси согласия, соответствующей кристаллографическому направлению  $[001]$  в поверхностной пленочной структуре  $6H-SiC$  и кристаллографическому направлению  $[111]$  кремниевой монокристаллической подложки.

На рисунке 9 показаны экспериментальные спектры POP потока ионов водорода ( $E_0=1.1$  МэВ), полученные для случайной ориентации гетероструктуры  $6H-SiC/Si$  относительно направления распространения ионного потока, а также в условиях совпадения этого направления с осью ориентационного согласия монокристаллической пленки карбида кремния и кремниевой подложки.

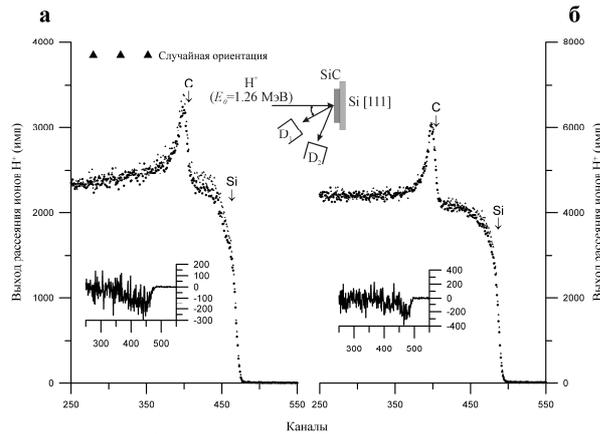


Рис. 11. Спектры ROP потока ионов  $H^+$  ( $E_0=1.1$  МэВ), полученные для случайной ориентации гетероструктуры 6H-SiC/Si относительно направления распространения потока ионов и в условиях согласия оси сопрягаемых структур с направлением распространения потока. Спектры были зарегистрированы одновременно под углами рассеяния  $\theta_1=160^\circ$  (а) и  $\theta_2=120^\circ$  (б). На врезках изображена геометрия измерений и разностные спектры между неориентированным и ориентированным положениями гетероструктуры. Энергетический шаг 1.9 кэВ/канал. Стрелками указаны энергии рассеяния ядрами поверхностных атомов.

Сравнение спектров, зарегистрированных в ориентированном и неориентированном положении гетероструктуры, демонстрирует некоторое уменьшение выхода рассеяния в ее ориентированном положении для поверхностного слоя толщиной около 2 микрон. Сопоставление данных по каналированию потока ионов водорода в гетероструктуре 6H-SiC/Si, полученной методом твердофазной эпитаксии с участием газовой фазы, и результатов элементного концентрационного профилирования по толщине этой мишени, представленных в таблице 1, позволяет утверждать, что в ней действительно наблюдается эпитаксиальное соответствие, причем по всей слоистой структуре.

В целом выполненный ионно-пучковый анализ гетероструктуры 6H-SiC/Si подтверждает наличие эпитаксиального соответствия во всей полученной структурной композиции, но при этом констатирует крайне низкое качество структурных элементов, составляющих эту композицию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе кратко изложены особенности исследований материалов с помощью каналирования ионов средних энергий в монокристаллических и эпитаксиальных структурах. Дано описание кристаллического строения структур кремния и карбида кремния и кратко изложены принципы гетерофазного эпитаксиального роста в условиях использования газофазовых реакций. Приведены рентгеновские и ионно-пучковые данные, позволяющие утверждать наличие эпитаксиального согласия между кремниевой подложкой и пленкой карбида кремния. При этом выявлено, что пленка SiC и переходный слой, имеющий высокую концентрацию вакансий, характеризуется значительной структурной неидеальностью.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в работе М.С. Афанасьеву. Работа выполнена в соответствии с государственным заданием №007-00220-18-00 и при частичной финансовой поддержке РФФИ (№16-07-00665). Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100».

### Литература

1. L.C. Feldman, J.W. Mayer, S.T. Picraux. Material analysis by ion channeling. Academic Press: New York. 1982. 300 p.

2. Э.Т. Шипатов. Каналирование ионов. Изд. Ростовского Университета: Ростов-на-Дону. 1986. 140 стр.
3. High energy ion beam analysis of solids / Eds. by G. Gotz, K. Gartner. Academic-Verlag: Berlin. 1988. 376p.
4. К.Н. Мухин. Введение в ядерную физику. Атомиздат: М. 1965. 720 стр.
5. Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, И.С. Ташлыков. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Изд. Университетское: Минск. 1987. 256 стр.
6. V.K. Egorov, A.P. Zuev, E.V. Egorov. Scintillation response of monocrystal PbWO<sub>4</sub> to random and channeling ions // NIM, 1996. B119. P. 418.
7. B. Schmidt, K. Wetzig. Ion beams in material processing and analysis. Springer: Wien. 2013. 418 p.
8. Ю.Н. Дроздов. Рентгеновская дифрактометрия гетероэпитаксиальных слоев и многослойных структур на их основе. Диссертация на соискание степени д.ф.м.н. изд. ИФМ РАН: Н. Новгород. 2006. 404стр.
9. В.К. Егоров, Е.В. Егоров, Ю.М. Миронов. Исследование гетероструктуры Au/мусковит. Сб. научных трудов 20 Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России». Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана: М. 2015. С. 178-184.
10. В.К. Егоров, Е.В. Егоров, М.С. Афанасьев. Ионно-пучковая диагностика тонкопленочных перовскитовых покрытий // Наноинженерия, 2012. №11. С. 38.
11. В. Лушкин, Ю. Таиров. Отечественный полупроводниковый карбид кремния, шаг к паритету // Современная электроника, 2009. №7. С. 12.
12. A.A. Lebedev. Heterojunctions and superlattices based on silicon carbide (topical review) // Semicond. Sci. Technol., 2006. v21. P. R17.
13. C. Ricciardi, E.A. Boot, F. Georgis, P. Mardracchi, U.M. Meotto, G. Barucca. Polycrystalline SiC growth and characterization // Appl. Surf. Sci., 2004. v238. P. 331.
14. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов. Способ изготовления изделия, содержащего кремниевую подложку с пленкой из карбида кремния на ее поверхности. Патент РФ №2363067, приоритет от 22.01.2008.
15. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. Новый метод твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии, модель и эксперимент // ФТТ, 2008. т50(7). С. 1188.
16. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов. Анизотропия твердофазной эпитаксии карбида кремния на кремнии // ФТП, 2013. т47(12). С. 1575.
17. D. Ventra, S.T. Pantelides. Atomic-scale mechanism of oxygen precipitation and thin film oxidation of SiC // Phys. Rev. Lett., 1999, v83. P. 1624.
18. S. Wang, M.D. Ventra, S.G. Kim, S.T. Pantelides. Atomic-scale dynamics of the formation and dissolution of carbon clusters in SiO<sub>2</sub> // Phys. Rev. Lett., 2001, v86. P. 5946.
19. С.А. Кукушкин, А.В. Лукьянов, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов. Эпитаксиальный карбид кремния на 6-двоймовой пластине кремния // Письма в ЖТФ, 2014. т.40, вып. 1. С. 71.
20. В.К. Егоров, Е.В. Егоров, М.С. Афанасьев. Возможности ионно-пучковой диагностики тонкопленочных эпитаксиальных и неориентированных структур // Изв. РАН, серия Физическая, 2014. т78(6). С. 700.
21. E. Rauhala. Proton elastic scattering cross-sections of carbon, nitrogen and silicon for backscattering analysis in the energy range 0.7-2.5 MeV // Nucl. Inst.&Meth., 1986. B12. P. 447.
22. J. Tirira, Y. Serruys, P. Trocellier. Forward recoil spectrometry, application to hydrogen determination in solids. Plenum: New York. 1996. 440 p.
23. А. Верна, П. Кришна. Полиморфизм и политипизм в кристаллах. Мир: М. 1969. 274 стр.
24. Г.Г. Гнесин. Карбинокремниевые материалы. Металлургия: М. 1977. 216 стр.
25. J.A. Lely. Darstellung von einkristallen von silicium cardib und beherrschung von art und menge der eingebauten verunreinigungen // Ber. Dtsch. Keram. Ges., 1955. v32. P. 226.
26. Л.С. Палатник, И.И. Папиров. Эпитаксиальные пленки. ГРФМЛ: М. 1971. 480 стр.

27. С.А. Кукушкин, А.В. Осипов, Н.А. Феоктистов. Синтез эпитаксиальных пленок карбида кремния методом замещения атомов в кристаллической решетке кремния (обзор) // Физика твердого тела, 2014. т56(8). С. 1457.
28. R.L. Doolittle. Algorithm for the rapid simulation of Rutherford backscattering spectra // NIM, 1985. B9. P.344.

## Разработка инверсных интегрированных покрытий с использованием фотонно-кристаллической структуры

*Е.Н. Галаганова, Е.В. Панфилова*

*Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-ая Бауманская, д.5, [lenagalaganowa@mail.ru](mailto:lenagalaganowa@mail.ru)*

*В данной работе рассмотрен процесс получения инверсной структуры металлической пленки для разработки технологии изготовления тонкопленочных селективных слоев абсорберов солнечной энергии, выполненных на основе фотонно-кристаллических структур. Актуальность темы состоит в получении современной технологии производства поглощающих покрытий для абсорберов солнечной энергии.*

*Development of inverse integrated coatings using a photonic crystal structure. E.N. Galaganova, E.V Panfilova. The process of obtaining an inverse structure of a metal film to develop the technology of manufacturing thin-film selective layers of solar energy absorbers based on photonic crystal structures is considered. The actuality of the issue consists in obtaining a modern technology for the production of selective coatings for solar energy absorbers.*

### Введение

Перспективным способом повышения эффективности солнечных элементов является встраивание в их конструкцию фотонно-кристаллического слоя, увеличивающего вероятность абсорбции фотонов в рабочей среде элемента [1]. Имеющиеся в настоящий момент разработки предполагают использование литографических способов получения таких слоев [2]. В данной работе отражены основные этапы получения таких слоев с помощью комбинации методов самоорганизации коллоидных частиц и вакуумных методов осаждения материалов таких покрытий.

Такая технология позволит, во-первых, сформировать фотонно-кристаллический подпоглощающий слой. Такой вариант конструкции солнечного элемента будет предотвращать выход излучения из абсорбера за счет его отражения и преломления фотонно-кристаллическим слоем. Во-вторых, будет возможно получить ячеистое покрытие, применение которого сможет поглощать вторичные лучи, то есть частично отраженные при падении на абсорбер (рис. 1). Применение данного покрытия в качестве верхнего слоя композитного солнечного элемента сможет увеличить КПД всего устройства.

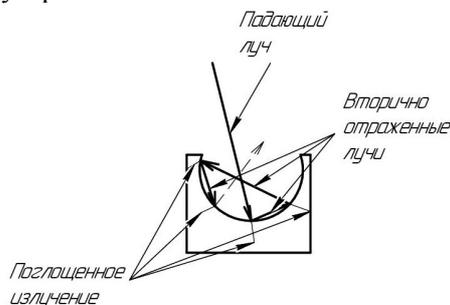


Рис. 1. Оптический эффект ячейки абсорбера.