

УДК 621.315.592

## ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

© 2014 г. Н. В. Латухина, А. С. Рогожин,  
С. Сайед, В. И. ЧепурновФГБОУ ВПО «Самарский государственный университет»,  
ул. Акад. Павлова, д. 1, Самара, 443011, Россия

### Введение

Применение многослойных гетероструктур в фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) на базе кремния позволяет значительно увеличить их эффективность [1, 2]. Перспективным в этом направлении является использование в качестве рабочего чувствительного слоя с нанокристаллами кремния, а также слоев широкозонных материалов. При этом спектр поглощения ФЭП расширяется в коротковолновую область за счет квантово-размерного увеличения ширины запрещенной зоны кремния в нанокристаллах и поглощения в широкозонном материале высокоэнергичных фотонов. Эффективной системой нанокристаллов кремния может быть слой пористого кремния, так как стенки пор представляют неупорядоченную систему квантовых ям, нитей и квантовых точек [3–5]. Кроме того, благодаря развитой системе пор площадь поглощающей поверхности фотоприемника значительно увеличивается. Однако использованию пористого кремния в ФЭП препятствует ряд существующих проблем:

– низкая воспроизводимость результатов из-за неконтролируе-

мых факторов технологического процесса;

– нестабильность параметров пористого кремния, обусловленная остающимся в его порах реактивом;

– высокое электрическое сопротивление пористого кремния.

Решением этих проблем может быть создание пористого слоя локально на поверхности с затравками порообразования, а также использование стабилизирующего покрытия, в качестве которого может выступать широкозонный полупроводник карбид кремния. Цель работы — исследование фотоэлектрических свойств образцов многослойных фоточувствительных структур с локально созданным на рабочей поверхности пористым слоем и стабилизирующим покрытием из карбида кремния. Пористый слой изготавливали электрохимическим травлением на кремниевых подложках с различным типом поверхности: шлифованной, полированной, текстурированной (заполненной правильными четырехгранными пирамидами). Затравками порообразования на шлифованной и текстурированной поверхности служат углубления микрорельефа, где напряжен-

Рассмотрены особенности технологии изготовления, а также результаты исследования морфологии, электрофизических и фотоэлектрических свойств фоточувствительных структур на основе кремния, содержащих слой карбида кремния и пористого кремния. Пористый слой создан на поверхности монокристаллического подложки кремния методом электролитического травления во фторсодержащих растворах. Использованы пластины с разным микрорельефом поверхности — полированной, шлифованной, текстурированной. Карбидизация образцов, приводящая к образованию гетероструктур SiC/Si, проведена методом газотранспортной эндотаксии в потоке водорода в вертикальном реакторе с холодными стенками с использованием графитового контейнера. Исследованы структура и состав изготовленных гетероструктур SiC/Si на разных типах структурированной поверхности поликристаллического и монокристаллического кремния, включая поверхность пористого слоя кремния. Показано, что в процессе эндотаксии на всех типах поверхности образуется фаза монокристаллического карбида кремния кубической модификации. Проведено исследование морфологии изготовленных структур методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Зафиксировано наличие нитевидных образований различной структуры на поверхностях без пор, которые идентифицированы как карбидокремниевые, а также цилиндрических или конических образований на пористой поверхности, природа которых неясна. Построены графики вольт-амперных и ампер-ваттных характеристик для всех типов изготовленных структур, общий вид которых свидетельствует о наличии в них нескольких потенциальных барьеров. Проанализированы фотоэлектрические свойства структур и перспективность их использования в фотоэлектрических преобразователях солнечных элементов.

**Ключевые слова:** пористый кремний, нанокристалл, карбид кремния, гетероструктуры, эндотаксия, вольт-амперные характеристики, фотоэлектрические свойства.

Латухина Наталья Виленовна — кандидат техн. наук, доцент, e-mail: natalat@yandex.ru; Рогожин Антон Сергеевич — аспирант, e-mail: iiiNamko@yandex.ru; Сайед Ахмад Сайед — магистрант, e-mail: s.saeed34@yahoo.com; Чепурнов Виктор Иванович — кандидат техн. наук, доцент, e-mail: chvi44@yandex.ru.

ность электрического поля максимальна, поэтому пористый слой на таких поверхностях образуется локально в местах соприкосновения пирамид [5—7]. Образцы с полированной поверхностью выполняли роль контрольных. На поверхности пористого слоя создавали эпитаксиальный слой карбида кремния, и в результате образцы представляли гетероструктуры Si/SiC с большой площадью поглощающей поверхности.

### Образцы и методы исследования

Эксперимент проводили на моно- и поликристаллических (с-Si) пластинах кремния с текстурной, шлифованной и полированной поверхностью  $p$ -типа проводимости с удельным сопротивлением от 5 до 10 Ом · см. Исходная толщина образцов составляла от 270 до 450 мкм в зависимости от типа пластины. Слой пористого кремния получали при анодной электрохимической обработке пластин монокристаллического и поликристаллического кремния в травильных смесях на основе плавиковой кислоты с этанолом или фтористого аммония с изопропиловым спиртом. Плотность анодного тока в электролитической ячейке составляла от 5 до 20 мА/см<sup>2</sup>, время травления — от 30 до 45 мин. Для измерения фотоэлектрических характеристик пористый слой формировали на структурах с заранее созданным на глубине 0,5 мкм диффузионным  $p$ — $n$ -переходом со стороны  $n$ -слоя.

Гетероструктуру Si/SiC изготавливали методом химического транспорта в открытой системе твердофазных кремния и углерода газом-носителем водородом в зону эпитаксии с последующим осаждением на подложках кремния с пористым слоем. Карбидизацию подложек кремния в потоке водорода осуществляли в вертикальном реакторе с холодными стенками. Графитовый контейнер с тепловыми экранами и горизонтально установленными подложками имеет по высоте градиент температуры, обеспечивающий однородное пересыщение по парам углеводородов от секции к секции. Пары углеводородов образуются по обратимой реакции углерода с водородом. Источник углерода — это свободный углерод и карбидизированное покрытие контейнера. Диапазон температур 1360—1380 °С и поток водорода диффузионной очистки 0,5 л/мин обеспечивают условия формирования эпитаксиального карбида кремния со скоростью 1,5 мкм/мин. Варьируя давление водорода на входе в систему, скорость потока водорода в системе, температуру в зоне исходных подложек и реагентов можно управлять процессом гетероэпитаксии карбида кремния на подложках кремния [8].

Морфологию изготовленных структур исследовали методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии с использованием отражательного растрового электронного микроскопа

SUPRA 25–30–85 и просвечивающего электронного микроскопа Zeiss Libra 120.

Фазовый состав поверхностного слоя определяли методом рентгеновской дифрактометрии на многофункциональном рентгеновском дифрактометре Rigaku Ultima IV по методике исследования монокристаллических и тонкопленочных образцов.

Для изучения электрофизических свойств на образцы методом термического испарения в вакууме наносили алюминиевые контакты: со стороны рабочей поверхности в виде дискретных кругов диаметром 1 мм, с тыльной стороны — сплошным слоем. Процесс проводили в вакуумной камере испарителя установки ВУП-4 при остаточном давлении газов не выше 10<sup>-5</sup> мм рт. ст. (1 мм рт. ст. = 133,322 Па) После напыления образцы нагревали в вакууме до температуры 500—600 °С в течение 20 мин для уменьшения контактного сопротивления.

Фотоэлектрические исследования включали в себя измерение вольт-амперных, вольт-ваттных и ватт-амперных характеристик при освещении естественным светом и лампой накаливания со спектром излучения, близким к естественному солнечному спектру АМ 1,5. Все измерения проводили в стационарном режиме при комнатной температуре.

### Результаты и их обсуждение

При электролитическом травлении текстурной поверхности поры формируются лишь на стыках отдельных пирамид, в местах наибольшей напряженности электрического поля. При этом травление по глубине идет достаточно равномерно, образуя систему вертикальных щелевидных пор. Диаметр пор варьируется от единиц до сотен нанометров, глубина пор зависит от времени травления и плотности анодного тока и может достигать сотни микрометров. Исследование пористого слоя методом растровой электронной микроскопии показало, что на стенках пор в этих условиях травления образуется нанокристаллический кремний в виде квантовых нитей и квантовых точек различного размера. Структура с локальными включениями пористого слоя, полученная методом селективного электрохимического травления текстурной поверхности, обладает двумя важными достоинствами: во-первых, она более устойчива к процессам деградации и, во-вторых, имеет по всей площади области с малым удельным сопротивлением — это оставшиеся нерастравленные крупные пирамиды. Наличие таких областей значительно облегчает задачу создания электрических контактов к рабочей стороне фоточувствительной структуры [9—12].

Данные рентгеновского фазового анализа образцов после процесса эпитаксии свидетельствуют о том, что в результате карбидизации на поверхности кремния образуется слой карбида кремния кубической модификации толщиной несколько ми-

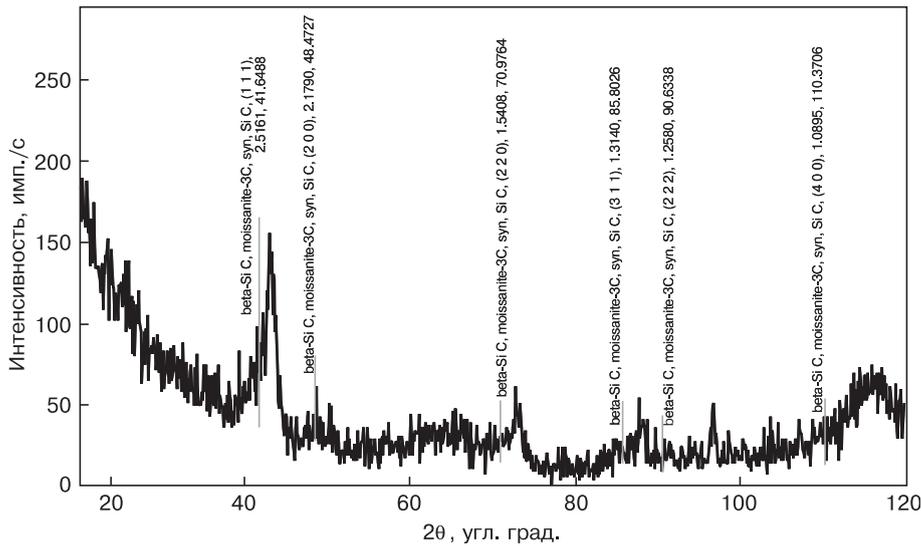


Рис. 1. Рентгеновская дифрактограмма поверхностного слоя образцов. Выделены линии карбида кремния

Fig. 1. X-ray Diffraction pattern of Specimen Surface Layer. Silicon Carbide Lines are Highlighted

крометров. Все присутствующие на рентгеновской дифрактограмме линии карбида кремния смещены относительно своих равновесных значений. Это говорит о деформации его кристаллической решетки, вызванной несовпадением периодов кристаллических решеток кубического карбида кремния и кремния, которое составляет ~ 20 % (рис. 1).

Исследования изображений гетероструктур карбида кремния на кремнии, полученных с помощью растрового электронного микроскопа на образцах с различным типом поверхности, показали, что на поверхности пористого слоя при ее карбидизации, помимо слоя карбида кремния, формируются наноструктуры двух видов: длинные нитевидные образования типа нановолокон или нанотрубок, свободно лежащие на поверхности, и более короткие образования цилиндрической или конической формы, расположенные перпендикулярно к поверхности (рис. 2). Исследования отделенных от подложки нитевидных образований, проведенные на просвечивающем электронном микроскопе, показали, что нановолокна толщиной 40—50 нм имеют явно выраженную внутреннюю волокнистую структуру с сильно различающимися по контрасту областями толщиной в несколько десятых нанометра, на более тонких образованиях такая структура не выявлена (рис. 3). Известно, что при эпитаксии в условиях пересыщения газовой фазы углеродом в присутствии атомов кремния, наряду с углеродными нанотрубками, формируются нановолокна и нанотрубки карбида кремния [13—15]. Это, по-видимому, имеет место и в нашем случае: более тонкие нитевидные однородные образования являются углеродными трубками, в то время как более толстые представляют собой нановолокна карбида кремния. Природа коротких образований цилиндрической или конической формы, расположенных перпендикулярно к поверхности,

неясна. Можно предположить, что это нанотрубки карбида кремния. Начало их формирования происходит внутри цилиндрических пор. Атомы углерода, образующие слой карбида кремния на поверхности поры, продолжают рост этого слоя за ее пределами, сохраняя цилиндрическую форму и диаметр поры. Данную гипотезу подтверждает тот факт, что на поверхности без пор таких образований не наблюдается, так как условия для формирования нанотрубок отсутствуют.

Анализ измеренных вольт-амперных характеристик изготовленных структур показал, что для всех образцов в области прямого смещения наблюдаются участки с изломом в диапазоне напряжений от 1 до 2 В (рис. 4, см. также 4 стр. обложки). Это свидетельствует о смене механизма

напряжений от 1 до 2 В (рис. 4, см. также 4 стр. обложки). Это свидетельствует о смене механизма

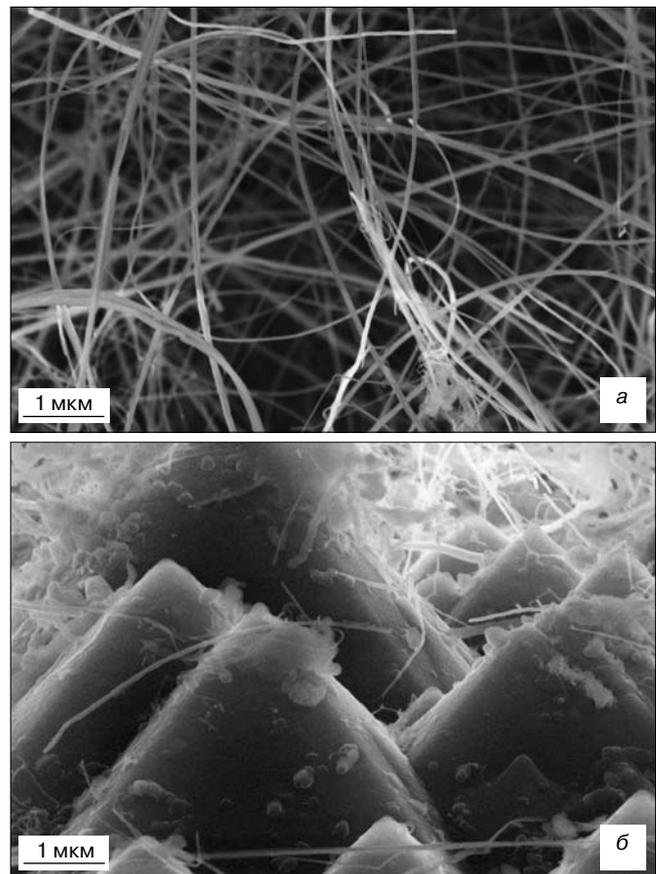


Рис. 2. Изображения исследованных образцов Si и Si/SiC, полученные методом растровой электронной микроскопии: а — нановолокна, образовавшиеся на полированной поверхности кремния (вид сверху); б — поверхность гетероструктуры SiC/Si, образованной на текстурированной поверхности кремния с порами (вид сбоку)

Fig. 2. SEM Images of Si and Si/SiC Specimens: (a) Nanofibers forming on polished silicon surface (top view), (b) surface of SiC/Si heterostructure forming on textured porous silicon surface (side view)

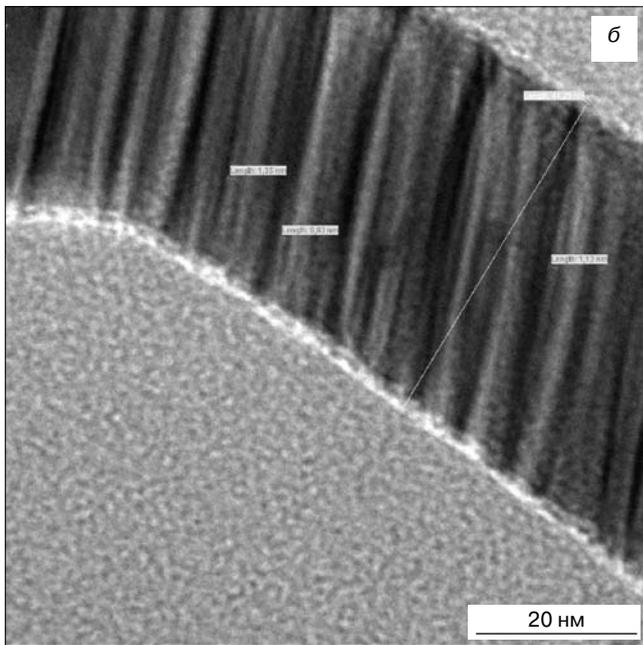
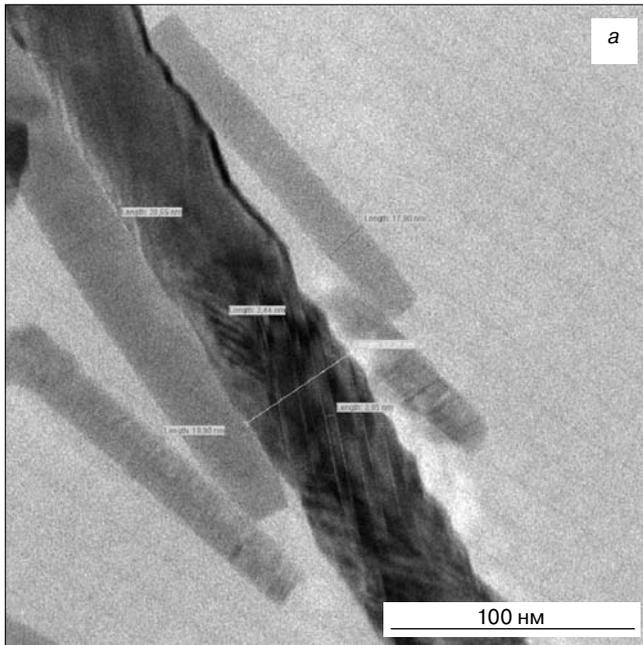


Рис. 3. Изображения нитевидных образований, формирующихся при карбидизации на поверхности кремниевых подложек, полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа

Fig. 3. TEM Images of Carbide Filiforms on Silicon Substrates

токопереноса в области более высоких напряжений. Аппроксимация линейных участков кривых вольт-амперных характеристик дает отсечку по оси напряжений, значение которой примерно определяет значение контактного напряжения. Для исходных некарбидизированных образцов отсечка составила от 1,2 до 1,5 В, а для структур с карбидом кремния, сформированным на поверхности пористого слоя, она заметно выше (от 2,2 до 2,5 В). Эти данные говорят о существовании более высокого потенциального барьера на границе пористого кремния с карбидом кремния.

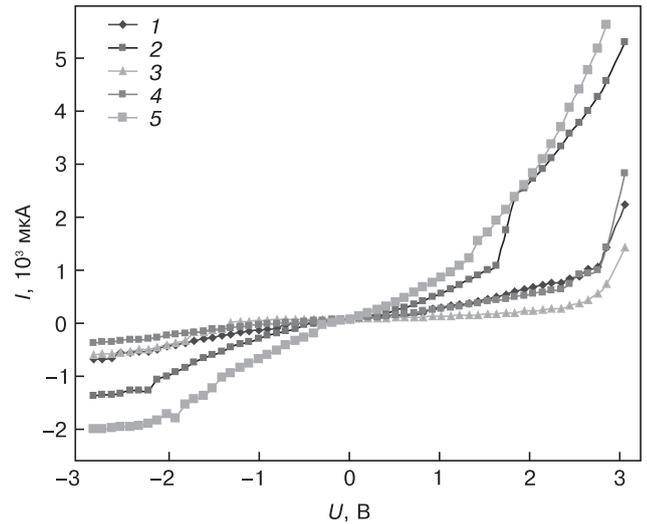


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики гетероструктур карбида кремния на кремнии:

1 — подложка — пористый слой полированного образца; 2 — текстурированная поверхность кремния; 3, 4 — пористый слой образца с текстурированной поверхностью и *p-n*-переходом; 5 — поликристаллический кремний  
Fig. 4. CV Curves of Silicon Carbide on Silicon Heterostructures: (1) Substrate (Porous Polished Specimen Layer), (2) Textured Silicon Surface, (3, 4) Porous Specimen Layer with Textured Surface *p-n* Junction, (5) Polycrystalline Silicon

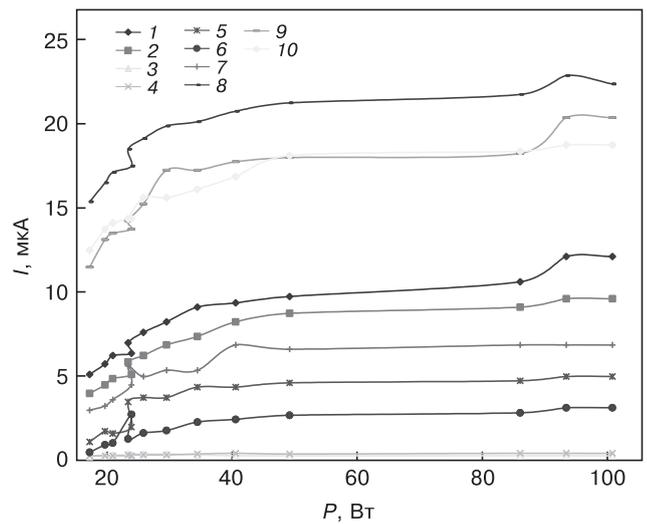


Рис. 5. Ватт-амперные характеристики образцов гетероструктур SiC/Si и различного типа:

1 — SiC на поликристаллическом кремнии с полированной поверхностью; 2 — на краю SiC и *c-Si* с полированной поверхностью; 3 — поликристаллический кремний с полированной поверхностью; 4 — *c-Si* с полированной поверхностью; 5 — SiC на поликристаллическом кремнии; 6 — *c-Si* с текстурированной поверхностью; 7 — поликристаллический кремний с текстурированной поверхностью; 8 — *c-Si* с текстурированной поверхностью и *p-n*-переходом; 9, 10 — поликристаллический кремний с текстурированной поверхностью и *p-n*-переходом

Fig. 5. Power-Voltage Curves of SiC/Si Heterostructure Specimens: (1) SiC on Polycrystalline Silicon with Polished Surface, (2) Edge of SiC and *c-Si* with Polished Surface, (3) Polycrystalline Silicon with Polished Surface, (4) *c-Si* with Polished Surface, (5) SiC on Polycrystalline Silicon, (6) *c-Si* with Textured Surface, (7) Polycrystalline Silicon with Textured Surface, (8) *c-Si* with Textured Surface and *p-n* Junction, (9, 10) Polycrystalline Silicon with Textured Surface *p-n* Junction

Для всех типов структур были проведены измерения ватт–амперных характеристик (рис. 5, см. также 4 стр. обложки). Из рис. 5 видно, что почти на всех кривых ватт–амперных зависимостей имеются несколько точек перегиба и выхода на насыщение, расположенных примерно в одних и тех же областях значений падающей мощности. Перегибы в области малых уровней входной мощности (20—30 Вт) связаны с поглощением излучения в приповерхностной области полупроводника и разделением носителей полем барьера, образованного на границе алюминиевого контакта с кремнием или карбидом кремния. Излучение более высокой мощности (40—50 Вт) поглощается в более глубоких слоях полупроводника. Для образцов со слоем карбида кремния как на пористом слое, так и на поверхности без пор резкий скачок фототока наблюдается при уровне освещенности 80—90 Вт. Отсюда можно сделать вывод, что генерированные излучением такой мощности носители заряда разделяются полем гетероперехода «карбид кремния — кремний». Аналогичный скачок фототока примерно в той же области значений входной мощности (80—90 Вт) наблюдается для образца с текстурированной поверхностью без пор, что обусловлено разделением носителей полем  $p-n$ -перехода, существующего в структуре изначально.

### Заключение

Разработана технология электролитического травления в растворах на основе плавиковой кислоты или фтористого аммония, которая позволяет получить слои пористого кремния толщиной от 3 до 20 мкм на шлифованной, полированной и текстурированной поверхностях монокристаллических пластин кремния, а также на поверхности поликристаллического кремния. Установлено, что возможно получение пористого слоя с сохранением существующего вблизи поверхности  $p-n$ -перехода. Технология газофазной эндотаксии позволяет создать гетероструктуры SiC/Si на всех типах исследуемых образцов, в том числе на пористом слое без его разрушения. В процессе газофазной эпитаксии на поверхности монокристаллического кремния возможно образование наноструктур двух типов: нитевидных и наноструктур трубчатого типа. Вид сформированных структур зависит от типа поверхности: на полированной преимущественен рост нитевидных структур, а на текстурированной — трубчатых. Выявлено, что все полученные по рассмотренной технологии образцы обладают заметной фоточувствительностью. Лучшие фотоэлектрические характеристики прояв-

ляют образцы с пористым слоем на текстурированной поверхности с диффузионным  $p-n$ -переходом и гетероструктуры SiC/Si, созданные на такой же поверхности.

### Библиографический список

1. Garcia-Linares, P. Advances on multijunction solar cell characterization aimed at the optimization of real concentrator performance / P. Garcia-Linares, C. Dominguez, P. Voarino, P. Besson, M. Baudrit // AIP Conf. Proc. – 2014. – V. 1616. – P. 110.
2. Conebeer, G. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells / G. Conebeer, M. Green, R. Corkish, Y. Cho, E.-C. Cho, C.-W. Jiang, T. Fangsuwannarak, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, T. Trupke, B. Richards, A. Shalav, K.-L. Lin // Thin Solid Films. – 2006. – V. 511/512. – P. 654–662.
3. Bisi, O. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics / O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi // Surf. Sci. Rep. – 2000. – V. 38. – P. 1–126.
4. Bilyk, T. Yu. Improvement of silicon solar cells performance by using of nanostructured silicon layer / T. Yu. Bilyk, M. M. Melnichenko, O. M. Shmyryeva, K. V. Svezhentsova // Электроника и связь (Электроніка та зв'язок, Electronics and Communications). – 2010. – V. 6(59). – P. 101–106.
5. Латухина, Н. Новые перспективы старых материалов: кремний и карбид кремния / Н. Латухина, В. Чепурнов, Г. Писаренко // Электроника НТБ. – 2013. – № 4(00126). – С. 104–110.
6. Латухина, Н. В. Кремний и карбид кремния: новые перспективы развития / Н. В. Латухина, В. И. Чепурнов, Г. А. Писаренко, А. С. Рогожин // Сб. трудов 12 Междунар. науч. конф.–шк. «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение». – Саранск, 2013. – С. 35.
7. Латухина, Н. В. Структуры с макропористым кремнием для фотопреобразователей на кремниевой подложке / Н. В. Латухина, Н. А. Нечаева, В. А. Храмов, А. В. Волков, А. Н. Агафонов // Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике. Сб. докл. 18 Междунар. симп. – Харьков, 2006. – Т. 2. – С. 207–211.
8. Латухина, Н. В. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нанопористым кремнием / Н. В. Латухина, Т. С. Дереза, С. В. Ивков, А. В. Волков, В. А. Деева // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 3(29). – С. 66–71.
9. Латухина, Н. В. Фоточувствительная матрица на основе пористого микрокристаллического кремния / Н. В. Латухина, Г. А. Писаренко, А. В. Волков, В. А. Китаева // Вестн. Самарского гос. ун-та. Естественно-науч. сер. – 2011. – № 5 (86). – С. 115–121.
10. Чепурнов, В. И. Пат. № 2370851. Способ самоорганизующейся эндотаксии моно 3С-SiC на Si подложке / В. И. Чепурнов / Заявл. 01.2006.
11. Латухина, Н. В. Фоточувствительные гетероструктуры на основе пористого нанокристаллического кремния для ФЭП / Н. В. Латухина, А. С. Рогожин // Кн. тез. IX Междунар. конф. и VIII Школы молодых ученых «Кремний-2012». – СПб., 2012. – С. 257–258.
12. Яровой, Г. П. Кремниевые фотоэлектрические преобразователи для космической и авиационной отрасли / Г. П. Яровой, Н. В. Латухина, А. С. Рогожин, А. С. Гуртов, С. В. Ивков, С. И. Миненко // Изв. ШНЦ РАН. – 2012. – Т. 14, № 1(2). – С. 521–524.
13. Кузнецов, В. Л. Общие закономерности формирования углеродных наноструктур и нитевидных кристаллов карбида кремния на поверхности металлических катализаторов / В. Л. Кузнецов, А. Н. Усольцева, И. Н. Мазов // Российский хим. журнал. – 2004. – Т. XLVIII, № 5. – С. 37–45.
14. Харламов, А. И. Полые наноструктуры карбида кремния / А. И. Харламов, Н. В. Кириллова, С. Н. Каверина // Теоретическая и экспериментальная химия. – 2002. – Т. 38, № 4. – С. 232–237.
15. Wei, B. Q. Simultaneous growth of silicon carbide nanorods and carbon nanotubes by chemical vapor deposition / B. Q. Wei, J. W. Ward, R. Vajtai, P. M. Ajayan, R. Ma, G. Ramanath // Chem. Phys. Lett. – 2002. – V. 354, iss. 3–4. – P. 264–268.

Авторы выражают благодарность аспиранту СГАУ В. А. Подлипнову за исследования, проведенные на растровом электронном микроскопе, и студентке МГУ А. Федоренко за исследования, выполненные на просвечивающем электронном микроскопе.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2012 г.

## Photosensitive Heterostructures on the Basis of Nanocrystal Porous Silicon

**Natalya Vilenovna Latukhina** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of radio physics and semiconductors micro- and nanoelectronic department (natalat@yandex.ru); **Anton Sergeevich Rogozhin** — Postgraduate Student, (iiiNamko@yandex.ru); **Saed Akhmad Saed** — Postgraduate Student (s.saeed34@yahoo.com); **Victor Ivanovich Chepurnov** — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of radio physics and semiconductors micro- and nanoelectronic department (chvi44@yandex.ru).

**Samara State University,**

1 Akademik Pavlov Str., Samara 443011, Russia

**Abstract.** In this work the investigations of technology, morphology, electric and photoelectric properties of the silicon photosensitive structures have been represented. The structures included layers of the silicon carbide and the porous silicon. The porous layer was formed on the surface of the single crystal silicon substrates by the method of electrolytic etching in fluoride containing solutions. Plates with different microrelief surface (polished, honed, textured) were used. Carbidization of the samples leading to the formation of heterostructures on SiC/Si was conducted by the method of gas endotaxin in a hydrogen stream in a vertical reactor with cold walls and a graphite container. The structure and composition of the SiC/Si heterostructures on the different surface structures of poly- and single crystal silicon, including surface of porous silicon layer have been investigated. We show that in the process of endotaxy of all types of surfaces forms a single crystal silicon carbide phase of cubic modification. The morphology of the resultant structures has been investigated by scanning and transmission electron microscopes. Different filiform formations were found on the pore-free surface, which are identified as silicon carbide, and the cylindrical or conical structures of the unclear nature were observed on the porous surface. The current-voltage and current-power curves have been plotted for all types of the structures, the general appearance of which indicates the presence of several potential barriers. The photoelectric properties of the structures have been analyzed along with the prospect of their use in solar cells.

**Keywords:** porous silicon nanocrystal, silicon carbide, heterostructures, endotaxemia, volt-ampere characteristics, photoelectric properties

## References

1. Garcia-Linares P., Dominguez C., Voarino P., Besson P., Baudrit M. Advances on multijunction solar cell characterization aimed at the optimization of real concentrator performance. *AIP Conf. Proc.* 2014, vol. 1616, p. 110. DOI: 10.1063/1.4897040
2. Conebeer G., Green M., Corkish R., Cho Y., Cho E.-C., Jiang C.-W., Fangsuwannarak T., Pink E., Huang Y., Puzzer T., Trupke T., Richards B., Shalav A., Lin K.-L. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells. *Thin Solid Films.* 2006, vol. 511–512, pp. 654–662.
3. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics. *Surface Science Report.* 2000, vol. 38, pp. 1–126.
4. Bilyk T. Yu., Melnichenko M. M. Shmyryeva O. M., Svezhentsova K. V. Improvement of silicon solar cells performance by using of

nanostructured silicon layer. *Electronics and Communications.* 2010, vol. 6(59), pp. 101–106 (In Ukr.)

5. Latukhina N., Chepurnov V., Pisarenko G. New perspectives of the old materials: silicon and silicon carbide. *Electronic NTB.* 2013, no. 4 (00126), pp. 104–110 (In Russ.)

6. Latukhina N., Chepurnov V., Pisarenko G., Rogozin A. Kremnii i karbid kremniya: novye perspektivy razvitiya [Silicon and silicon carbide: new perspectives of the development]. *The compilation proceedings of the 12th international scientific conference-school «Materials nano-, micro-, optoelectronics and fiber optics: physical properties and application».* Saransk, 2013. p. 35. (In Russ.)

7. Latukhina N., Nechaeva N., Hramkov V., Volkov A., Agafonov A. Struktury s makroporistym kremniem dlya fotopreobrazovatelei na kremnievoi podlozhke [Structure of macroporous silicon for solar cells on silicon substrate]. *Thin films in optics and nanoelectronics. Proceedings of the 18th international Symposium.* Khar'kov. 2006, vol. 2, pp. 207–211 (In Russ.)

8. Latukhina N., Dereglazova T., Ivkov S., Volkov A., Deeva V. Photovoltaic properties of structures with micro- and nano-porous silicon. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = News of Samara Science Center of Russian Academy of Science.* 2009, vol. 11, no. 3(29), pp. 66–71 (In Russ.)

9. Latukhina N., Pisarenko G., Volkov A., Kitaeva V. Photosensitive matrix based on porous microcrystalline silicon. *Vestnik of Samara State University.* 2011, no. 5(86), pp. 115–121. (In Russ.)

10. Chepurnov V. Patent No 2370851. A way of self-organizing endotaxy mono 3C–SiC on Si substrate. 2006. (In Russ.)

11. Latukhina N., Rogozin A. Fotochuvstvitel'nye geterostrukturny na osnove poristogo nanokristallicheskogo kremniya dlya FEP [Photosensitive heterostructure based on porous nanocrystalline silicon for solar cells]. *Book of abstracts of the IX international conference and VIII of the school of young scientists «Silicon-2012».* SPb, 2012. Pp. 257–258 (In Russ.)

12. Yarovoy G., Latuhina N., Rogozhin A., Gurtov A., Ivkov S., Minenko S. Silicon photoelectric transducers for space and airspace branches. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN = News of Samara Science Center of Russian Academy of Science.* 2012, vol. 14, no. 1(2), pp. 521–524. (In Russ.)

13. Kuznecov V., Usolceva A., Mazov I. General regularities of formation of carbon nanostructures and whiskers of silicon carbide on the surface of metal catalysts. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal = Russian Journal of General Chemistry.* 2004, vol. XLVIII, no. 5, pp. 37–45. (In Russ.)

14. Harlamov A., Kirillova N., Kaverina S. Hollow nanostructures of silicon carbide. *Teoreticheskaya i eksperimental'naya khimiya = Theoretical and Experimental Chemistry.* 2002, vol. 38, no. 4, pp. P. 232–237. (In Russ.)

15. Wei B. Q., Ward J. W., Vajtai R., Ajayan P. M., Ma R., Ram-anath G. Simultaneous growth of silicon carbide nanorods and carbon nanotubes by chemical vapor deposition. *Chem. Phys. Lett.* 2002, vol. 354, iss. 3–4, pp. 264–268. DOI: 10.1016/S0009–2614(02)00108–2.)

**Acknowledgements.** The Authors wish to thank Samara State University Postgraduate Student V.A. Podlipnov for SEM Data and Moscow State University Student A. Fedorenko for TEM Data.

Received November 27, 2012