

УДК 537.533.3:621.3.049.77

## КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ И АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ

© 2012 Г.П. Яровой<sup>1</sup>, Н.В. Латухина<sup>1</sup>, А.С. Рогожин<sup>1</sup>, А.С. Гуртов<sup>2</sup>, С.В. Ивков<sup>2</sup>,  
С.И. Миненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный университет  
<sup>2</sup> ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ Прогресс»

Поступила в редакцию 26.03.2012

В работе анализируются перспективы использования для аппаратов космического и авиационного назначения кремниевых фотоэлектрических преобразователей нового поколения, созданных на основе многослойных структур на кремниевой подложке. Структуры включают в себя слои нанокристаллического пористого кремния, карбида кремния, диэлектрические покрытия из оксидов или фторидов редкоземельных элементов. Приведены результаты исследования электрических и оптических характеристик таких структур.

Ключевые слова: *фоточувствительные структуры, солнечные элементы, нанокристалл, гетеро-структуры, диэлектрические покрытия, оксиды и фториды редкоземельных элементов*

Высокоэффективные фотовольтаические преобразователи как источники энергии для летательных аппаратов вызывают большой интерес со стороны разработчиков космической и авиационной техники. Для космических аппаратов солнечные батареи являются широко применяемым источником энергии, в авиационной технике их использование также является перспективным для некоторых видов изделий, например, для легких беспилотных летательных аппаратов.

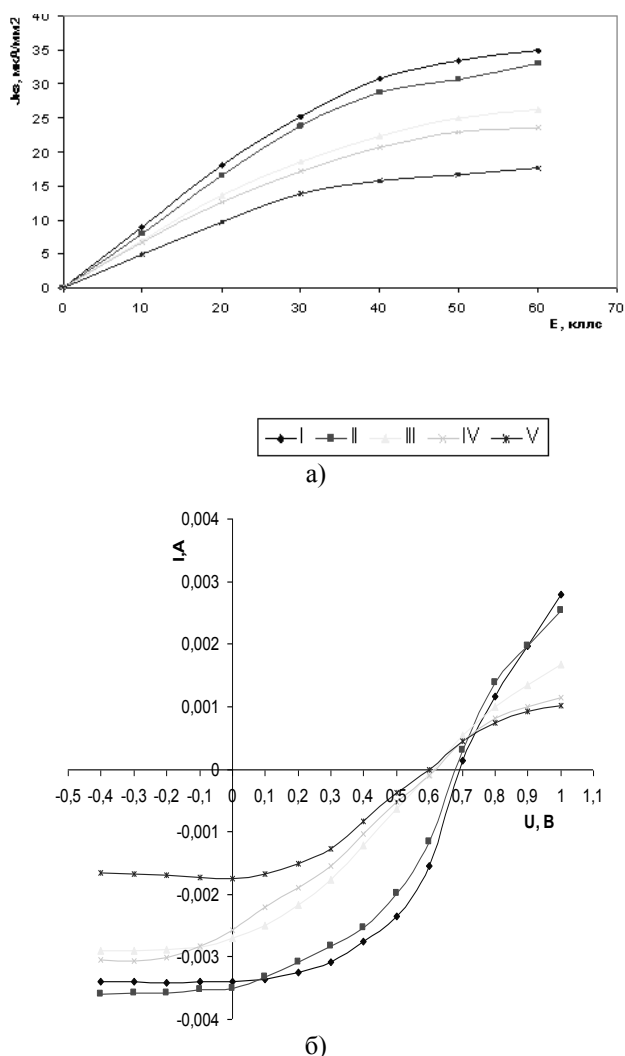
Основными используемыми базовыми материалами для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) являются кремний и арсенид галлия. Несмотря на то, что кремниевые ФЭП имеют худшие эксплуатационные характеристики, чем арсенидгаллиевые, кремний продолжает оставаться главным материалом фотовольтаической солнечной энергетики. Это обусловлено широкой распространенностью исходного сырья и развитой технологией изготовления самого материала и приборов на его основе, что обеспечивает существенно меньшую стоимость кремниевых ФЭП по сравнению с аналогичными устройствами на основе

арсенида галлия. Актуальной проблемой кремниевых ФЭП является повышение их КПД, ныне составляющий в среднем 15-17%. Интенсивные исследования в этом направлении в последнее десятилетие привели к тому, что темп роста КПД, составлявший в начале десятилетия примерно 0,3-0,4% в год, резко возрос и в 2008 г. уже сообщается о создании кремниевых фотоприемника с эффективностью 42,8% [1]. Высокие темпы роста КПД связаны с переходом к кремниевым ФЭП так называемого третьего поколения, представляющих собой многослойные, многобарьерные структуры, в которых присутствуют материалы с различной шириной запрещенной зоны  $E_g$ , благодаря чему удается уменьшить фундаментальные потери в кристалле, связанные с непоглощением фотонов с энергией меньшей, чем ширина запрещенной зоны кристалла, и термализацией кристаллической решетки при поглощении фотонов с энергией большей, чем  $E_g$  и превысить теоретический предел фотовольтаического преобразования энергии для монокристаллического кремния в 27% [2].

Увеличить спектральную чувствительность кремниевых ФЭП в длинноволновой части спектра может применение покрытий из оксидов и фторидов редкоземельных элементов (РЗЭ), благодаря наблюдаемому в этих материалах эффекту перепоглощения: возбуждения низкоэнергичными фотонами люминесцентных центров, связанными с ионами РЗЭ, которые генерируют фотоны с более высокими энергиями [3]. Кроме того, нанесение покрытий из пленок оксидов и фторидов РЗЭ позволяет

*Яровой Геннадий Петрович, президент, доктор физико-математических наук, профессор*  
*Латухина Наталья Виленовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: natalat@yandex.ru*  
*Рогожин Антон Сергеевич, аспирант*  
*Гуртов Александр Сергеевич, заместитель начальника отдела. E-mail: gas1501@mail.ru*  
*Ивков Сергей Валериевич, аспирант. E-mail: sergeyivkov@virtualsoccer.ru*  
*Миненко Сергей Иванович, начальник отдела*

значительно снизить рекомбинационные потери. Обладая высокой прозрачностью (98-99%) во всем видимом диапазоне солнечного спектра и подходящим значением показателя преломления (1,8-2,2), эти материалы проявляют и хорошие пассивирующие свойства на поверхности кремния благодаря высокой геттерирующей способности редкоземельных ионов, входящих в их состав. Нанесение пленки оксида или фторида РЗЭ на рабочую поверхность кремниевое фотопреобразователя позволяет снизить коэффициент отражения для излучения с длиной волны 620 нм с 30% до 3%-4% и увеличить фототок более чем на 50% [4]. На рис. 1 а, б приведены люкс- и вольт-амперные характеристики диодных структур с покрытиями из фторидов РЗЭ и без покрытий. Из рисунка видно, что лучшие характеристики имеют структуры с покрытиями.



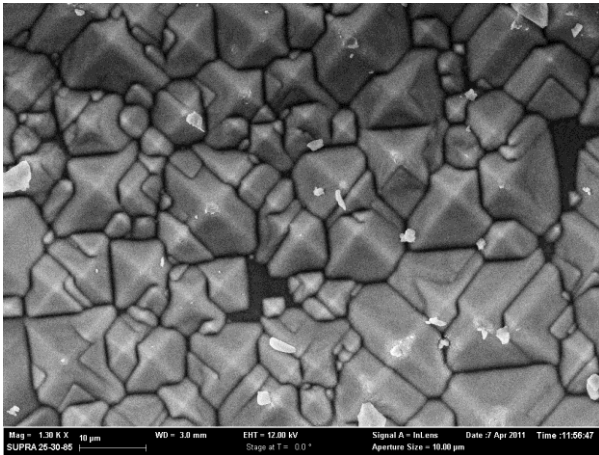
**Рис. 1.** Люкс-амперные (а) и вольт-амперные (б) характеристики диодных структур с полированной (ПП) и текстурированной (ТП) поверхностью: I – ТП со слоем DyF<sub>3</sub>; II – ТП со слоем ErF<sub>3</sub>; III – ПП с покрытием из ErF<sub>3</sub>; IV – ТП без покрытия; V – ПП без покрытия

Уменьшить термализацию можно использованием в многослойных структурах более широкозонных, чем кремний, материалов. Таким материалом может выступать слой широкозонного материала карбида кремния или слой с нанокристаллами кремния, в которых  $E_g$  определяется квантово-размерными эффектами и может быть заметно больше, чем  $E_g$  объемного монокристаллического кремния. Применение этих материалов позволяет расширить область спектральной чувствительности кремниевого ФЭП в более коротковолновую часть спектра солнечного излучения по сравнению с традиционными кремниевыми ФЭП.

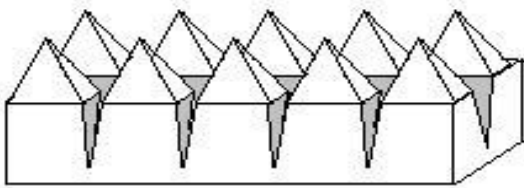
Эффективной системой нанокристаллов кремния может быть слой пористого кремния (ПК), так как стенки пор представляют собой неупорядоченную систему квантовых ям, нитей и квантовых точек [5]. Наличие этих квантово-размерных образований обеспечивает высокую чувствительность пористого кремния в коротковолновой части спектра, вплоть до ультрафиолетовой его части, к тому же, благодаря развитой системе пор, площадь поглощающей поверхности фотоприемника значительно увеличивается. Однако существует ряд проблем, которые препятствуют широкому использованию пористого кремния в ФЭП. Это низкая воспроизводимость результатов из-за неконтролируемых факторов технологического процесса, нестабильность параметров ПК из-за остающегося в его порах реактива, а также высокое электрическое сопротивление ПК. Решением этих проблем может быть создание пористого слоя локально на поверхности с травками порообразования, а также использование стабилизирующих покрытий (SiC, OPЗЭ, ФРЗЭ). В данной работе пористый слой создавался на текстурированных кремниевых подложках с поверхностью, заполненной правильными четырехгранными пирамидами [6, 7]. Порообразование на такой поверхности происходит только в местах соприкосновения оснований пирамид, поэтому в результате травления структур с заранее созданным мелкозалегающим р-п-переходом исходный n-тип проводимости на гранях тетраэдрических вершин сохраняется, так что образующаяся структура представляет собой ряд вертикальных диодов, объединенных общей подложкой (рис. 2).

Такие структуры, обладая повышенной фоточувствительностью в коротковолновой части спектра, как пористый кремний [5], в тоже время имеют достаточно низкое электрическое сопротивление и хорошую стабильность. На рис. 3 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных образцов

фоточувствительных структур с пористым слоем при различных уровнях освещенности: 800Lx (естественная), 2100Lx, 15000Lx (максимальная), измеренные спустя полгода хранения на воздухе в условиях естественного освещения. Специальных защитных покрытий структуры не имели, однако за время хранения сохранили свои электрические свойства практически без изменений.

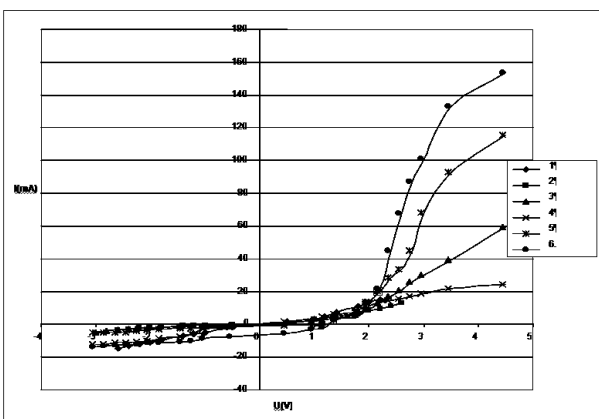


а



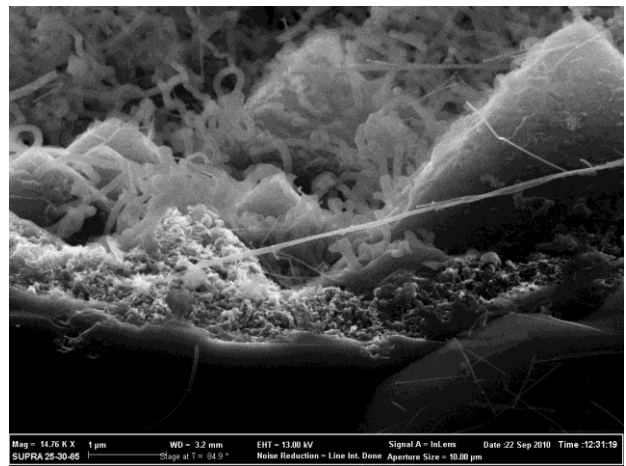
б

**Рис. 2.** Изображение исходной текстурированной поверхности, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (а) и схематичное изображение образца со щелевидными порами (б)



**Рис. 3.** Световые ВАХ ПК с текстурированной поверхностью, измеренные через полгода после изготовления: 1 – Si 800Lx, 2 – por-Si 800Lx, 3 – Si 2100Lx, 4 – por-Si 2100Lx, 5 – Si 15000Lx, 6 – por-Si 15000Lx

На поверхности слоя пористого кремния методом термической эндотаксии из газовой фазы выращивался слой карбида кремния, таким образом были получены гетероструктуры SiC/Si, которые также имели высокие и стабильные фотоэлектрические параметры. При проведении процесса эндотаксии в условиях пересыщения газовой фазы углеродом на стенках существующих цилиндрических пор происходило образование углеродных нанотрубок (рис. 4), что облегчало создание омического контакта к слою карбида кремния. В табл. 1 приведены основные фотоэлектрические параметры изготовленных структур



**Рис. 4.** РЭМ-изображение поверхности гетероструктуры SiC /Si с углеродными нанотрубками

Из приведенных результатов видно, что использование разработанных методик изготовления слоев и структур позволяет создать фоточувствительные структуры с достаточно высокими фотоэлектрическими параметрами, сохраняющими свои значения в течение длительного времени.

**Таблица 1.** Основные параметры структур

Тип структуры	F <sub>зап.</sub>	U <sub>хх.</sub> , (В)	K <sub>выпр.</sub>	P <sub>вх.</sub> , (Вт)	кпд (%)
ПК с SiC на Si	0,81	1,56	1248	1672	29
ПК с ТП на Si	0,67	1,27	30,7	454	22,8

**Выводы:** можно сделать вывод, что применение в конструкции ФЭП на кремниевой подложке слоев пористого нанокристаллического кремния, широкозонного карбида кремния, диэлектрических покрытий из фторидов или оксидов РЗЭ позволяет повысить его эффективность практически до уровня ФЭП на основе арсенида галлия. В тоже время технология изготовления таких структур не

сильно отличается от традиционной технологии изготовления кремниевых ФЭП, сохраняя ее очевидные преимущества: экономичность, экологичность, безопасность, доступность сырья, развитая индустрия производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Lenta.ru: Новости: КПД солнечных батарей достиг рекордного значения <http://lenta.ru/news/2007/07/25/solar/14.03.2008>
2. Conebeer, G. Silicon nanostructures for third generation photovoltaic solar cells. / G. Conebeer, M. Green, R. Corkish et al. // Thin Solid Films. 2006. V. 511-512. P. 654-662.
3. Shalav, A. Application of NaYF<sub>4</sub>:Er<sup>3+</sup> up-converting phosphors for enhanced near-red silicon solar cell response / A. Shalav, B. Richards, T. Trupke // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. 013505.
4. Аношин, Ю.А. Просветляющие и пассивирующие свойства пленок оксидов и фторидов редкоземельных элементов / Ю.А. Аношин, А.И. Петров, В.А. Рожков, М.Б. Шалимова // Журнал технической физики. 1994. Т. 64, № 10. С. 118-123.
5. 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.
6. Латухина, Н.В. Структуры с макропористым кремнием для фотопреобразователей на кремниевой подложке / Н.В. Латухина, Н.А. Нечаева, В.А. Храмов и др. // Тонкие пленки в оптике и нанозлектронике. Сборник докладов 18 международного симпозиума. Харьков. 2006. Т. 2. С. 207-211.
7. Латухина, Н.В. Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нано-пористым кремнием / Н.В. Латухина, Т.С. Дерезлазова, С.В. Ивков и др. // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11, № 3 (29). С. 66-71.

## SILICON PHOTOELECTRIC CONVERTERS FOR SPACE AND AVIATION INDUSTRY

© 2012 G.P. Yarovoy<sup>1</sup>, N.V. Latukhina<sup>1</sup>, A.S. Rogozhin<sup>1</sup>, A.S. Gurtov<sup>2</sup>, S.V. Ivkov<sup>2</sup>,  
S.I. Minenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State University

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise State Scientific Production  
Rocket Space Center "TsSCB-Progress"

In work prospects of using the devices for space and aviation purpose of silicon photoelectric converters of new generation, created on the basis of multilayered structures on silicon substrate are analyzed. Structures include layers of nanocrystal porous silicon, silicon carbide, dielectric coverings from oxides or fluorides of rare earth elements. Results of research the electric and optical characteristics of such structures are resulted.

Key words: *photosensitive structures, solar elements, nanocrystal, heterostructures, dielectric coverings, oxides and fluorides of rare earth elements*

---

Gennadiy Yarovoy, President, Doctor of Physics and Mathematics, Professor  
Nataliya Latukhina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

E-mail: natalat@yandex.ru

Anton Rogozhin, Post-graduate Student

Alexander Gurtov, Deputy Chief of the Department. E-mail: gas1501@mail.ru

Sergey Ivkov, Post-graduate Student. E-mail: sergeyivkov@virtualsoccer.ru

Sergey Minenko, Chief of the Department