

УДК 537.533.3:621.3.049.77

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР С МИКРО- И НАНО-ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

© 2009 Н.В. Латухина<sup>1</sup>, Т.С. Дереза<sup>1</sup>, С.В. Ивков<sup>1</sup>, А.В. Волков<sup>2</sup>, В.А. Деева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный университет

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 30.12.2008

В работе исследовались фотоэлектрические свойства структур с поверхностным чувствительным слоем пористого кремния различного типа. Определены спектральные характеристики коэффициента отражения в диапазоне длин волн 400–927 нм и тока короткого замыкания в диапазоне длин волн 400–1100 нм. Показано, что спектральный диапазон чувствительности расширяется по сравнению с монокристаллическим кремнием в коротковолновую область.

Ключевые слова: пористый кремний, текстурированная поверхность, глубокое анодное травление, спектральная зависимость, фоточувствительность, коэффициент отражения, ток короткого замыкания

Пористый кремний привлекает внимание исследователей в связи с широким спектром своих потенциальных применений [1]. В оптоэлектронике наряду со светоизлучающими структурами интересны перспективы применения ПК в фотоприемниках. Благодаря развитой системе пор площадь поглощающей поверхности фотоприемника значительно увеличивается, а спектральная чувствительность расширяется в коротковолновую область за счет увеличения ширины запрещенной зоны кремния в нано-размерных кремниевых нитях, образующих стенки пор. Однако широкое применение ПК не осуществлено до сих пор из-за сложности в управлении свойствами получаемого пористого слоя, связанной с различными технологическими параметрами, часто не контролируемые. Чтобы сделать процесс создания ПК хорошо воспроизводимым, в качестве исходной используют поверхность с заранее заданными центрами порообразования. Для фоточувствительных структур пористый слой формировался на текстурированной поверхности монокристаллического кремния, широко используемой в солнечных элементах и представляющей собой поверхность, заполненную правильными четырехгранными пирамидами [2]. Порообразование на такой поверхности происходит в местах соприкосновения оснований пирамид. Получаемый пори-

стый слой по своим размерным характеристикам может быть отнесен к макропористому кремнию с размерами пор и кристаллитов более десятка нанометров. Было показано, что структуры с пористым слоем, образованным на текстурированной поверхности, обладают заметно более высокими фотоэлектрическими характеристиками, чем структуры с текстурированной поверхностью без пористого слоя, к тому же их параметры оказываются достаточно стабильными даже без какого-либо защитного покрытия, что нехарактерно для пористого кремния, нестабильность которого до сих пор остается проблемой.

В данной работе проводилось исследование спектральных характеристик фоточувствительных структур со слоем ПК, образованным на поверхности монокристаллического кремния различного типа: полированной, текстурированной, эпитаксиальной.

Слои макропористого и пористого кремния формировались методом глубокого анодного травления (ГАТ) в водных растворах плавиковой кислоты с добавлением этилового спирта или уксусной кислоты. Плотность анодного тока на образце изменялась от 10 до 50 мА/см<sup>2</sup>. Время травления составляло от 10 до 70 минут. Для получения текстурированной поверхности образцы подвергались анизотропному травлению в горячем водном растворе щелочи КОН. В результате травления поверхность была покрыта правильными четырехугольными пирамидами высотой от 2 до 7 мкм, степень заполнения поверхности пирамидами составляла 80–100%.

Для фотоэлектрических измерений были изготовлены диодные структуры, р-п-переход формировался диффузией со стороны текстурированной поверхности акцепторной примеси для

*Латухина Наталья Виленовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: natalat@yandex.ru*

*Дереза Татьяна Сергеевна, студентка.*

*E-mail: natalat@yandex.ru*

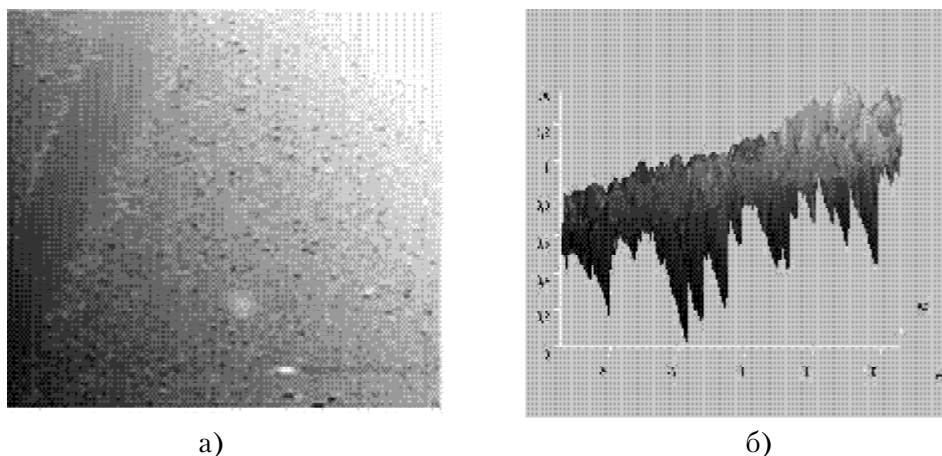
*Ивков Сергей Валерьевич, аспирант.*

*E-mail: sergeyivkov@virtualsoccer.ru*

*Волков Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: volkov@ssau.ru*

*Деева Виктория Александровна, студентка.*

*E-mail: febri@yandex.ru*



**Рис. 1.** Пористый кремний, полученный на полированной поверхности:  
*а* – СЗМ - изображение поверхности, размер рамки 10X10 мкм;  
*б* – 3D- изображение рельефа поверхности

подложек *n*-типа проводимости и донорной примеси для подложек *p*-типа проводимости. Глубина залегания *p-n*-перехода составляла 0,9 - 1 мкм. Использовались также готовые диодные структуры с эпитаксиальным *p-n*-переходом, в которых эпитаксиальный слой *n*-типа проводимости толщиной 10 мкм был выращен на подложке *p*-типа проводимости. На них текстурированная поверхность создавалась со стороны эпитаксиального слоя. В результате глубокого анодного травления на всех типах образцов формировались слои пористого кремния толщиной от нескольких микрон до сотни микрон, с *p-n*-переходом, расположенным внутри пористого слоя. Таким образом, на подложке формировалась система вертикальных *p-n*-переходов, выходящих на стенки пор.

Рельеф поверхности полученного макропористого слоя исследовался методом сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) на микроскопе Solver PRO-M. Измерения проводились атомно-силовой микроскопией в контактной моде, сканирование осуществлялось образцом. Радиус закругления иглы кантилевера составлял меньше 20 нм, угол раствора при вершине меньше 22°. Используемая методика позволяла получить трехмерное изображение исследуемой поверхности с разрешением до 10 нм (рис. 1,б и рис. 2,б).

На полированной поверхности образование пор шло равномерно по всей площади, и образовывался пористый слой с правильными круглыми порами, расположенными перпендикулярно к поверхности. Максимальный диаметр пор не превышал 0,1 мкм (рис. 1,а).

При травлении текстурированной поверхности поры формировались на стыке пирамид в виде узких щелей. При этом травление по глубине шло достаточно равномерно, образуя пористую структуру с вертикальными порами глуби-

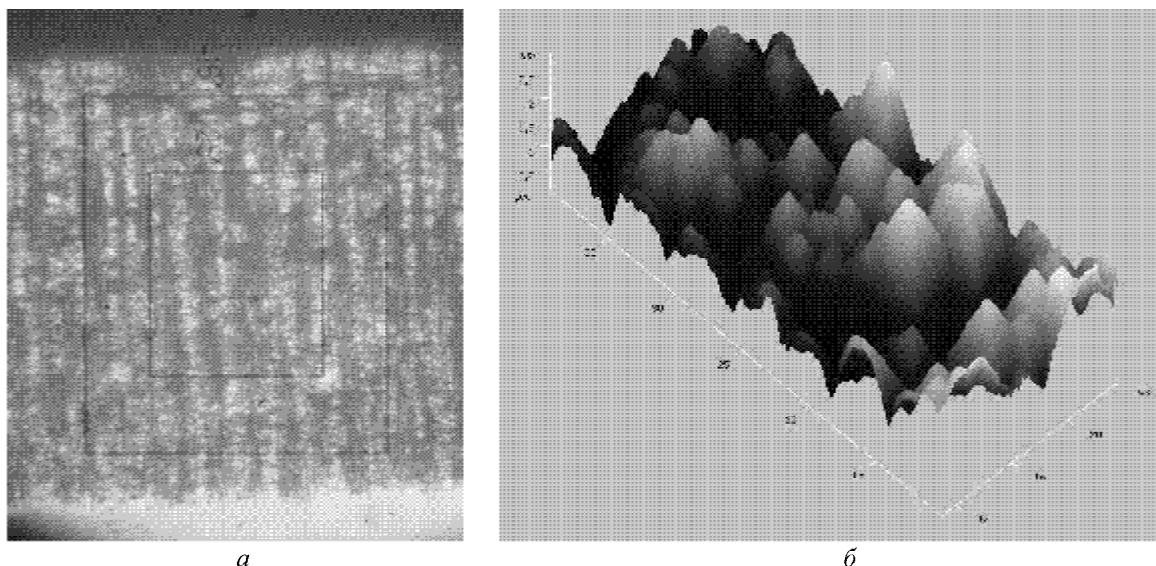
ной несколько десятков микрон (рис. 2, а, б). Происходило также некоторое сглаживание краев и вершин пирамид.

При травлении поверхности эпитаксиального слоя образование пор происходит по границам эпитаксиальных блоков с образованием похожих параллельных щелевидных пор, уходящих вглубь эпитаксиального слоя, но при этом не совсем перпендикулярно поверхности, а под небольшим наклоном.

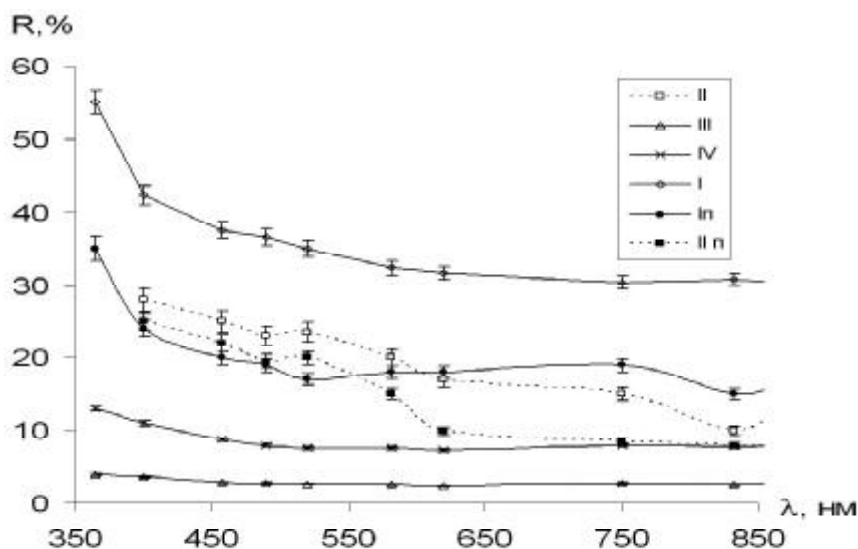
На изготовленных образцах проводилось измерение спектральной характеристики коэффициента отражения в видимой части спектра на фотометре отражения “ФО-1” методом сравнения с набором сменных светофильтров на длинах волн от 350 нм до 927 нм. Исследование спектральной зависимости тока короткого замыкания диодных структур проводилось в диапазоне 400 – 1000 нм. Измерения проводились при комнатной температуре. Спектральные зависимости коэффициента отражения для четырех типов поверхности изготовленных структур приведены на рис. 3.

Из рисунка видно, что создание на поверхности кремния микрорельефа в виде пирамид (кривые II, III, IV) или пор (кривая I<sub>п</sub>), или одновременно и того, и другого (кривая III<sub>п</sub>) существенно снижает коэффициент отражения по сравнению с полированной поверхностью (кривая I) во всем исследуемом спектральном диапазоне. При этом наиболее заметным оказывается уменьшение отражения в коротковолновой области для текстурированных поверхностей с минимальной высотой пирамид.

Создание пористого слоя на полированной поверхности снижает коэффициент отражения более чем вдвое по сравнению с исходной, и вид кривой спектральной зависимости несколько изменяется, что может быть связано с наличием ок-



**Рис. 2.** Пористый кремний, полученный на текстурированной поверхности:  
 а – микрофотография поперечного скола, размер внутренней рамки – 40X60 мкм, светлая область внизу – монокристаллический кремний;  
 б – 3D - изображение рельефа текстурированной поверхности пористого слоя, полученное методами СЗМ

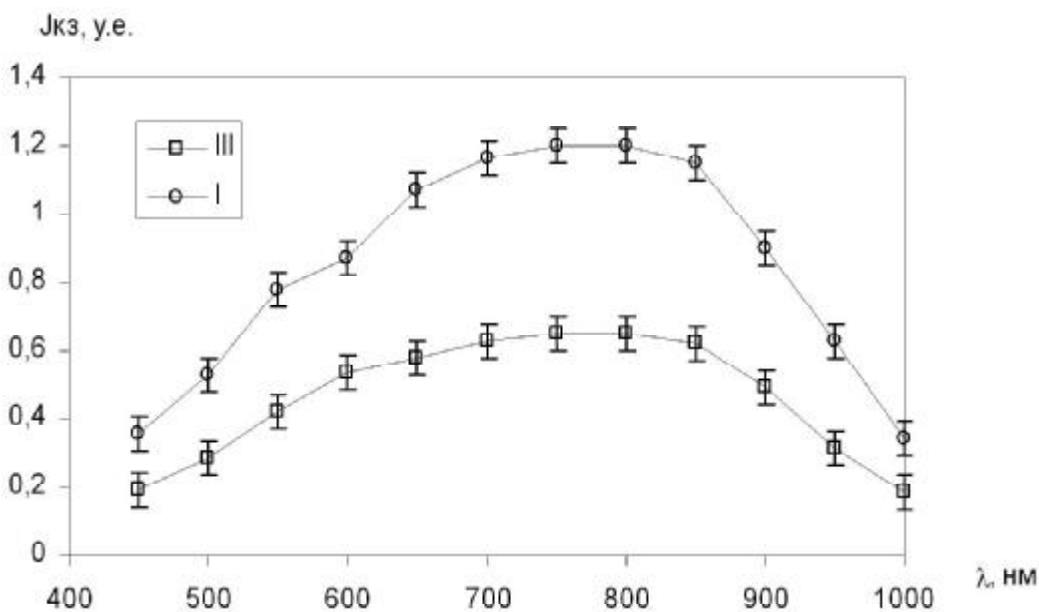


**Рис. 3.** Спектральные зависимости коэффициентов отражения поверхностей разного типа:  
 I – полированная; II – текстурированная с высотой пирамид до 7 мкм;  
 III – текстурированная с высотой пирамид до 5 мкм; IV – текстурированная с высотой пирамид от 2 до 3 мкм;  
 Ip – пористый слой на полированной поверхности; Iп – пористый слой на текстурированной поверхности II

сидной пленки на поверхности пористого кремния (кривые I и Iп). Коэффициенты отражения просто текстурированной поверхности и текстурированной поверхности с порами не сильно различаются между собой (на 5 – 6 %), причем ход спектральных зависимостей практически одинаковый (кривые II и IIп). Это обстоятельство отражает тот факт, что поры на текстурированной поверхности занимают очень небольшую часть площади, располагаясь между пирамидками.

Анализ спектральной зависимости фоточувствительности текстурированных структур пока-

зывает, что снижение отражения в коротковолновой области приводит лишь к незначительному относительному возрастанию тока короткого замыкания в этой области (рис. 4.). Этот эффект тем более мало заметен на фоне общего снижения тока короткого замыкания текстурированных структур по сравнению с полированными, что объясняется появлением дополнительных рекомбинационных центров, связанных с ионами щелочных металлов, которые остаются на поверхности после технологической операции анизотропного травления для создания пирамид.

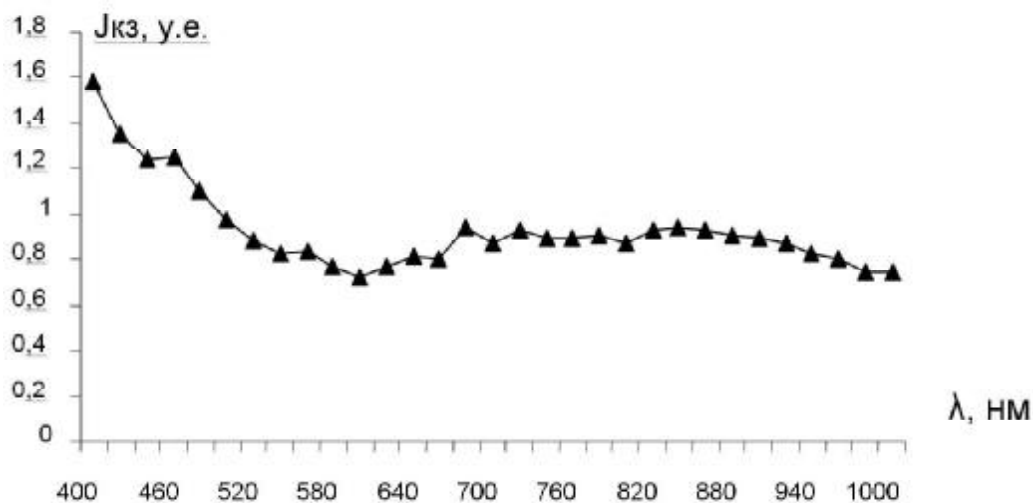


**Рис. 4.** Спектральные зависимости тока короткого замыкания диодных структур: I — с полированной поверхностью, III — с текстурированной поверхностью

Создание пор на текстурированной поверхности заметно меняет весь ход спектральной характеристики фоточувствительности, существенно увеличивая ее в коротковолновой части (рис. 5). Максимум спектральной чувствительности смещается от положения для монокристаллического кремния (880 — 900 нм) в область 400 нм. Аналогичный ход спектральной зависимости фоточувствительности наблюдается и для образцов диодных структур с пористым слоем, созданным на эпитаксиальной поверхности (рис. 6). Это изменение характера спектральной чувствительности можно объяснить поглощением в материале с большей шириной запрещенной зоны, чем монокристаллический кремний. Таким материалом могут быть нано-кристаллы кремния (кремниевые «нити»), образующиеся в

порах при глубоком анодном травлении. Подтверждением присутствия нано-размерных кремниевых «нитей» в исследуемых структурах может служить и некоторое увеличение фоточувствительности в длинноволновой части спектра. Этот эффект, наблюдаемый в нано-пористом кремнии [3, 4], обычно связывается с интерференционными явлениями или с рассеянием длинноволнового излучения на кремниевых нитях и, соответственно, снижением коэффициента отражения, что наблюдается и нашем случае (см. кривые II и IIп рис. 3).

Таким образом, проведенные исследования показывают, что предложенная технология создания пористого слоя с использованием поверхностей с заранее созданным микрорельефом позволяет изготовить фоточувствительные



**Рис. 5.** Спектральные зависимости тока короткого замыкания диодных структур с пористым слоем, образованным на текстурированной поверхности

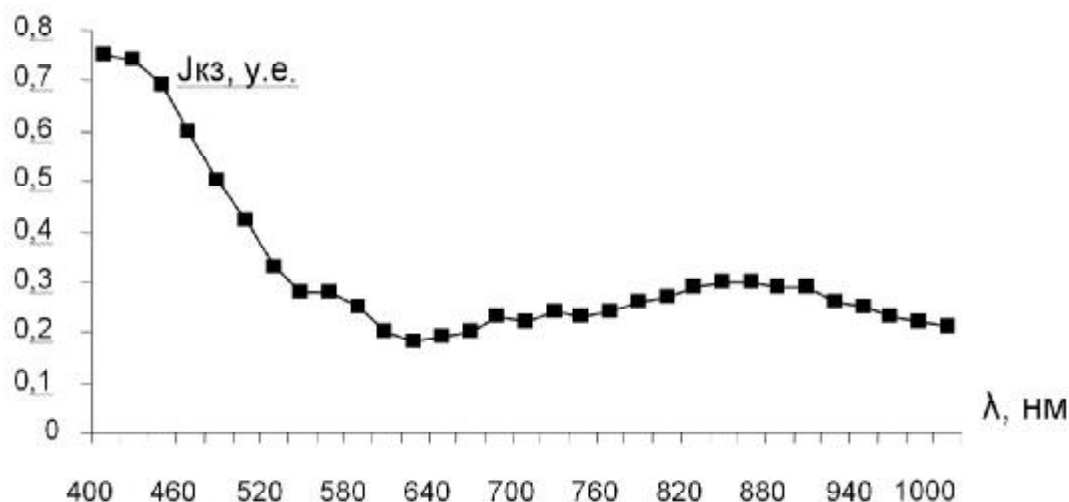


Рис. 6. Спектральные зависимости тока короткого замыкания диодных структур с пористым слоем, образованным на эпитаксиальной поверхности

кремниевые структуры с расширенным в коротковолновую область спектральным диапазоном чувствительности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics // Surf. Sci. Rep. 2000 / V. 38. — P. 1 — 126.
2. Латухина Н.В., Нечаева Н.А., Храмов В.А, Волков А.В., Агафонов А.Н. Структуры с макропористым кремнием для фотопреобразователей на кремниевой подложке // Тонкие пленки в оптике и наноэлектронике. Сборник докладов. 18 межд. симпозиума. Харьков. 2006 / Т.2. — С. 207 — 211
3. Астрова Е.В., Лебедев А.А., Ремешок А.Д., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. Фоточувствительность гетерограницы пористый кремний — кремний // ФТП. 1997. / Т. 31. — С. 159 — 161.
4. Блынский В.И., Малышев В.А. Кремниевые фотодиоды с пассивирующей пленкой из пористого кремния.// Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники. Труды восьмой межд. научно-техн. конференции. Таганрог. 2002. / Ч.2. — С. 53 — 55.

### PHOTOELECTRICAL PROPERTIES OF STRUCTURE WITH MICRO- AND NANO-POROUS SILICON

© 2009 N.V. Latukhina<sup>1</sup>, T.S. Dereglazova<sup>1</sup>, S.V. Ivkov<sup>1</sup>, A.V. Volkov<sup>2</sup>, V.A. Deeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Samara State University

<sup>2</sup> Samara State Aerospace University

Photoelectrical properties of structure with surface sensitive lay of different type porous silicon were investigated. Spectral dependences of reflectivity for 400÷927 nm wavelength and short circuit current for 400÷1000 nm wavelength were determined. As represented spectral range widen to short wavelength in comparison with single-crystal silicon.

Key words: porous silicon, textured surface, deep anodic etching, spectral dependence, photosensitivity, reflection coefficient, short circuit current

Natalya Latukhina, Candidate of Technics, Associate Professor. E-mail: natalat@yandex.ru

Tatyana Dereglazova, Student. E-mail: natalat@yandex.ru

Sergey Ivkov, Graduate Student.

E-mail: sergeyivkov@virtualsooccer.ru

Alexey Volkov, Doctor of Technics, Professor.

E-mail: volkov@ssau.ru

Viktoriya Deeva, Student. E-mail: febri@yandex.ru