

УДК 539.25:538.958:621.315.592.9

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ МАТРИЦА НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

© 2011 Н.В. Латухина, Г.А. Писаренко,¹ А.В. Волков, В.А. Китаева²

В работе представлены результаты экспериментальных исследований фотоэлектрических свойств матрицы фотодиодов, сформированной на основе пористого кремния. Слои пористого кремния были получены в процессе электрохимического травления пластин монокристаллического кремния с заранее созданным микрорельефом поверхности. На основании результатов исследований произведена оценка возможности использования полученной структуры в качестве составной части искусственной сетчатки глаза.

Ключевые слова: пористый кремний, электролитическое травление, текстурированная поверхность, фоточувствительность, искусственная сетчатка.

Введение

С развитием нанотехнологий полупроводниковые устройства находят все более и более широкое применение. Переход к элементам, структурные составляющие которых имеют размеры порядка сотен и единиц нанометров, позволяет полупроводниковой электронике освоить новые области применения и существенно увеличить доли компонент электроники в медицинских приложениях, способных заменить человеку его поврежденные органы. Один из примеров — искусственная сетчатка глаза (ASR) на основе кремниевой фоточувствительной матрицы [1; 2]. Созданная искусственная сетчатка представляет собой микрочип — матрицу из 5000 дискретных кремниевых фотодиодов, размещенных на пластинке диаметром 2 мм и толщиной 25 мкм, где каждый фотодиод снабжен собственным стимулирующим электродом. Фотодиоды осуществляют преобразование света в электрические импульсы, поступающие на стимулирующие электроды и возбуждающие зрительные нервные окончания. Подобный механизм работы искусственной сетчатки не требует никаких внешних источников питания.

Микрочипы ASR были имплантированы группе из 6 человек с серьезными заболеваниями органов зрения. Клинические исследования показали хорошую пе-

¹Латухина Наталья Виленовна (natalat@yandex.ru), Писаренко Галина Андреевна (galina_pisarenko@mail.ru), кафедра полупроводниковой электроники и нанотехнологий Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

²Волков Алексей Васильевич (volkov@ssau.ru), Китаева Виктория Александровна (febri@yandex.ru), кафедра наноинженерии Самарского государственного аэрокосмического университета 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

реносимость и эффективность работы искусственной сетчатки на основе кремния. Пациенты отмечали повышение резкости и улучшение цветового восприятия.

В данной работе исследуется возможность создания подобной фоточувствительной матрицы на основе пористого кремния с большей плотностью размещения отдельных светочувствительных элементов.

Для формирования подобной структуры предлагается использовать технологию создания методом селективного электролитического травления пористого слоя на пластине монокристаллического кремния с текстурированной поверхностью, то есть поверхностью с заранее созданным микрорельефом. Такая технология позволяет создать структуры специальной геометрии, обладающие высокими фотоэлектрическими характеристиками [3; 4].

1. Методика изготовления образцов

Для формирования слоев пористого кремния использовались пластины монокристаллического кремния (с-Si) с ориентацией поверхности по кристаллографической плоскости (100).

На первом этапе эксперимента проводилось текстурирование полированной поверхности пластин с-Si путем травления в горячем насыщенном щелочном растворе. Был сформирован микрорельеф, представляющий собой систему правильных четырехгранных пирамидок (рис. 1). Размеры полиэдров травления в виде тетрагональных пирамид с боковыми гранями (111), являющимися естественными поверхностями монокристалла и углом при вершине в $70,5^\circ$, могут изменяться в зависимости от режима травления от долей микрометра до нескольких десятков микрометров. В нашем случае высота самых крупных пирамид не превышала 7 мкм.

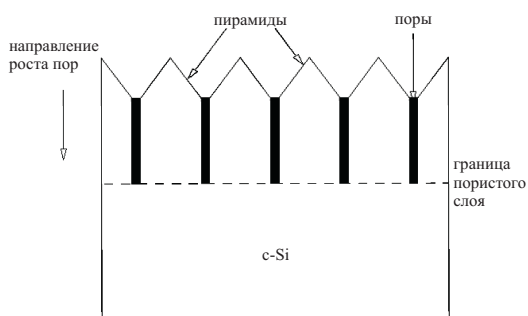


Рис. 1. Схематичное изображение структуры пористого кремния, сформированного на текстурированной поверхности монокристаллической подложки

Для получения фоточувствительных структур использовались образцы с мелкозалегающим (0,2–0,5 мкм) р-п-переходом на рабочей поверхности, созданным диффузией донорной примеси.

На втором этапе эксперимента пластины с-Si с уже сформированным поверхностным микрорельефом подвергались электрохимическому травлению в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты для образования пористого слоя. Образование пористого слоя происходило в процессе анодного травления кремния при плотности тока от 4 до 14 mA/cm^2 и концентрации плавиковой кислоты в растворе от 10 до 50 %.

При таком режиме травления зарождение пор начинается в углублениях имеющегося микрорельефа, т. е. на стыках пирамид, где напряженность электрического поля максимальна. С течением времени появившиеся поры продолжают свой рост вглубь кремниевого электрода, вершины и грани пирамид практически не подвергаются травлению (рис. 2). Таким образом, в результате травления поверхностный слой образца представляет собой систему параллельных столбиков с четырехгранными пирамидальными вершинами, отделенных друг от друга щелевидными порами. Если травлению подвергается структура с уже созданным вблизи рабочей поверхности *p-n*-переходом, на поверхности пирамидок сохраняется слой *n*-типа проводимости, легированный фосфором.

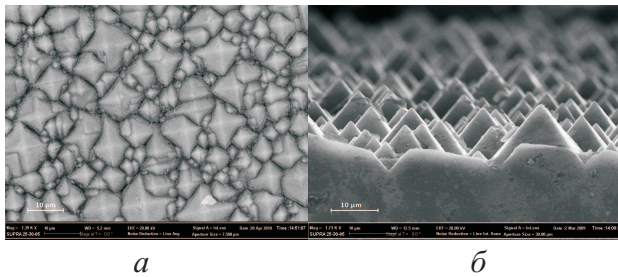


Рис. 2. РЭМ-изображение микрорельефа исходной текстурированной поверхности кремниевой пластины: *а* — вид сверху; *б* — вид с торца

2. Методики исследования

Для исследования морфологии поверхности образцов использовался растровый электронный микроскоп (РЭМ) "Supra-25" который давал возможность получить изображения поверхности с увеличением до 15000 раз с различных ракурсов (см. рис. 2). Изображения формировались при ускоряющем напряжении электронного пучка от 9 до 20 кВ.

Электрофизические измерения включали в себя исследование электропроводности изготовленных структур зондовыми методами. Использовался четырехзондовый метод, позволяющий определить величину удельного сопротивления в направлении, параллельном плоскости поверхности кремниевой пластины, и метод встречных зондов, позволяющий определить ту же величину в направлении, перпендикулярном плоскости поверхности кремниевой пластины (рис. 3, *а*, *б*).

Проводилась также оценка фотоэлектрических свойств образцов: измерялся ток короткого замыкания через структуру с *p-n*-переходом при освещении ее рабочей поверхности белым светом. Для измерения люкс-амперных характеристик (ЛАХ) исследуемый образец включался в электрическую цепь постоянного тока (рис. 4) и проводилось измерение тока цепи при различных значениях светового потока.

3. Анализ полученных результатов

Анализ РЭМ-изображений подтверждает селективность образования пористого кремния на поверхности текстурированной пластины (рис. 5). Выходы пор отчетливо видны в области оснований пирамид, в то время как на гранях и вершинах

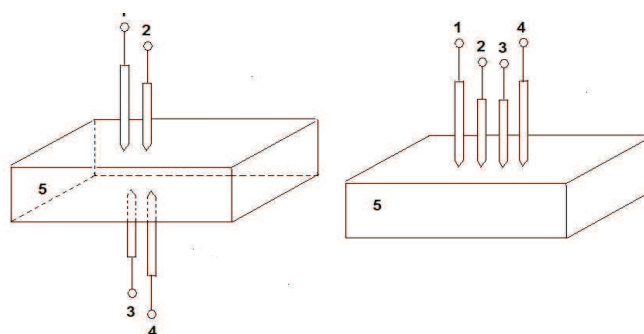


Рис. 3. Схемы зондовых методов измерения удельного сопротивления: а — встречных зондов; б — четырехзондовый. Ток пропускается через зонды 1 и 4, напряжение измеряется между зондами 2 и 3; 5 — полупроводниковая пластина

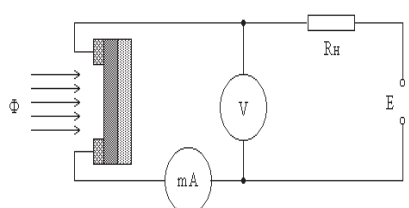


Рис. 4. Электрическая схема для измерения ЛАХ

поры отсутствуют. Судя по контрасту РЭМ-изображения, самые глубокие поры образуются на стыках пирамид (темные области на рис. 5). Здесь отдельные поры сливаются в узкие щели, отделяющие пирамидки друг от друга.

Таким образом, полученная структура представляет собой матрицу микронных кремниевых столбиков с торцами в виде тетрагональных пирамид, отделенных друг от друга областями пористого кремния. Поскольку пористый кремний обладает высоким электрическим сопротивлением, такая структура должна проявлять заметную анизотропию электропроводности, так как прохождение тока перпендикулярно плоскости поверхности осуществляется по монокристаллическим пирамидкам, являющимся продолжением низкоомной подложки, а параллельно плоскости поверхности — через высокоомные области пористого кремния. Исследования электропроводности зондовыми методами подтверждают наличие анизотропии электропроводности. Результаты измерений приведены в таблице. Среднее удельное сопротивление образца с пористым слоем по результатам измерений четырехзондовым методом (в направлении, параллельном плоскости кремниевой пластины) более чем на 3 порядка превышает среднее значение удельного сопротивления, полученное методом встречных зондов, в то время как для контрольного образца, на котором поры не создавались, это величины одного порядка.

Если создание пористого слоя происходит на текстурированной поверхности с заранее созданным мелкозалегающим p - n -переходом, каждый образованный в результате электролитического травления монокристаллический кремниевый столбик представляет собой фотодиод микронных размеров, так как присутствие мелкозалегающего p - n -перехода на гранях пирамид, являющихся торцами электро-

Таблица

Среднее удельное сопротивление образцов, измеренное четырехзондовым методом (ρ_4) и методом встречных зондов (ρ_2)

	ρ_4 , Ом·см	ρ_2 , Ом·см
контрольный образец	$10,5 \pm 0,11$	$3,8 \pm 0,11$
контрольный образец	$5 \cdot 10^4 \pm 0,11$	$3,8 \pm 0,11$

проводящих кремниевых столбиков, позволяет преобразовывать падающий на них свет в электрический заряд. Таким образом, каждый электропроводящий кремниевый столбик можно считать отдельным фотодиодом, и вся образующаяся структура представляет собой систему дискретных фотодиодов, отделенных друг от друга высокоомными областями пористого кремния.

Исследование ЛАХ изготовленных образцов показывает, что образцы с пористым слоем обладают значительно большей световой чувствительностью, чем контрольные образцы, на которых пористый слой не создавался (рис. 6). В то же время максимальная величина сигнала, который поступает с чувствительного элемента при высоком уровне освещенности, не превышает уровня сигнала, допустимого для зрительного нерва человека. Максимальная величина фототока изготовленной матрицы при освещенности 11000 лк не превышает 0,09 мА, а предельно допустимый уровень сигнала, который может воспринимать зрительный нерв человека без повреждения, составляет 0,8 мА.

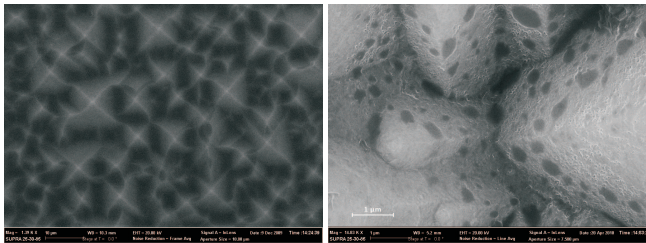


Рис. 5. РЭМ-изображение поверхности полученного образца с пористым кремнием

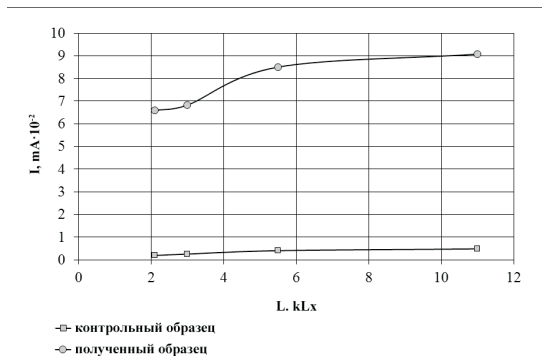


Рис. 6. ЛАХ контрольного образца и образца с пористым кремнием

Заключение

На пластине монокристаллического кремния путем анизотропного электрохимического травления была получена фоточувствительная структура, представляющая собой матрицу вертикальных дискретных диодов с торцевыми поверхностями в виде правильных тетраэдров. Сторона основания тетраэдров не превышает 10 мкм, так что на площади 1 мм² расположено до 10⁴ отдельных диодов.

Исследования показали, что структура обладает ярко выраженной анизотропией электропроводимости и выдающимися фотоэлектрическими характеристиками, что делает подобные структуры перспективным материалом для разработки искусственной сетчатки глаза

Литература

- [1] The development of subretinal microphotodiodes for replacement of degenerated photoreceptors / E. Zrenner [et al.] // *Ophthalmic Res.* 1997. V. 29. P. 269–280.
- [2] The Artificial Silicon Retina Microchip for the Treatment of Vision Loss From Retinitis Pigmentosa / A.Y. Chow [et al.] // *Arch.Ophthalmol.* 2004. V. 122(4). P. 460–469.
- [3] Структуры с макропористым кремнием для фотопреобразователей на кремниевой подложке / Н.В. Латухина [и др.] // *Тонкие пленки в оптике и нанoeлектронике: сб. докл. 18 Межд. симпоз. Харьков: ХФТИ; ИПП "Контраст", 2006. С. 207–211*
- [4] Фотоэлектрические свойства структур с микро- и нанопористым кремнием / Н.В. Латухина [и др.] // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2009. № 3(29). С. 66–71.

Поступила в редакцию 14/IX/2011;
в окончательном варианте — 24/X/2011.

PHOTOSENSITIVE MATRIX BASED ON POROUS MICROCRYSTALLINE SILICON

© 2011 N.V. Latukhina, D.A. Pisarenko,³ A.V. Volkov, V.A. Kitaeva⁴

The article presents the results of experimental researches of optoelectric properties of porous silicon. Layers of porous silicon were formed using electrochemical etching process in water-alcohol solutions of hydrofluoric acid on plates with a pre-established microrelief surface. Evaluation of possibility of using of created structure as the artificial retina component was performed based on the results of the research.

Key words: porous silicon, electrolytic etching, texturized surface, photosensitivity, artificial retina.

Paper received 14/*IX*/2011.

Paper accepted 24/*X*/2011.

³Latukhina Natalia Vilenovna (natalat@yandex.ru), Pisarenko Galina Andreevna (galina_pisarenko@mail.ru), the Dept. Of Semi-Conductor Electronics and Nano-Technology, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.

⁴Volkov Alexey Vasilevich (volkov@ssau.ru), Kitaeva Viktoria Alexandrovna (febri@yandex.ru), the Dept. of Nano-Engineering, Samara State Aerospace University, Samara, 443086, Russian Federation.