

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,
к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО, С. И. НИЧКАЛО,
Е. И. БЕРЕЖАНСКИЙ

УДК 621.315.592

Украина, г. Львов, НУ „Львовская политехника“;
Польша, г. Вроцлав, Международная лаборатория
сильных магнитных полей и низких температур
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Дата поступления в редакцию
24.05 2011 г.

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ КРИСТАЛЛЫ КРЕМНИЯ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Показана возможность использования в качестве антиотражающей поверхности фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) ансамблей нанопроволок кремния. Разработан технологический процесс получения наноразмерных структур ФЭП и исследованы их характеристики.

Солнечные элементы для альтернативной энергетики должны быть высокоэффективными, технологически простыми и иметь низкую стоимость изготовления и достаточную деградационную стойкость. Современные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) отвечают этим требованиям, но недостаточно рентабельны при использовании, т. к. имеют низкий КПД. Проводя оценку различных технологических решений по созданию ФЭП в соответствии с критерием низкой стоимости их получения, необходимо уделить внимание новейшим технологическим процессам и материалам, поскольку только они могут обеспечить низкую стоимость и относительно малые размеры поверхностного антиотражающего слоя [1].

Одним из наиболее перспективных способов повышения КПД преобразователей является уменьшение оптических потерь, т. е. потерь на отражение, что достигается нанесением антиотражающего покрытия. Привлекательным в этом аспекте является использование нитевидных нанокристаллов (ННК) кремния, которым посвящено немало научных работ за последние годы [2, 3]. В частности, в [4] показано, что структура из ансамбля ННК эффективнее поглощает свет,

чем пленочная. Устройства, основанные на ННК, имеют такие потенциальные преимущества перед стандартными планарными конструкциями:

— более низкая цена за счет уменьшения расхода материала;

— увеличение фототока за счет горячих носителей или многоэкситонных эффектов [5], а также за счет увеличения поглощения света;

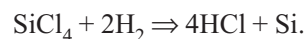
— возможность выращивания структур на расогласованных подложках, что радикально расширяет перспективы комбинирования материалов с различной шириной запрещенной зоны.

Целью настоящей работы является создание метода получения антиотражающего покрытия из ансамблей ННК кремния и исследования характеристик такой структуры.

Экспериментальные результаты

Для выращивания наноразмерных кристаллов использовали установку, блок-схема которой показана на рис. 1.

Осаждение кремния на подложку происходило по химической реакции



В реакторе роста 4 над кремниевой подложкой 5 при температуре около 600°C пропускали газовую смесь — SiCl_4 из барботера 2 и H_2 из генератора 1.

Согласно [2], роль примеси (металла-катализатора) состоит в формировании жидкой капли с относительно низкой температурой эвтектики. Поскольку жидкая капля является доминирующим состоянием при осаждении из пара, это приводит к перенасыщен-

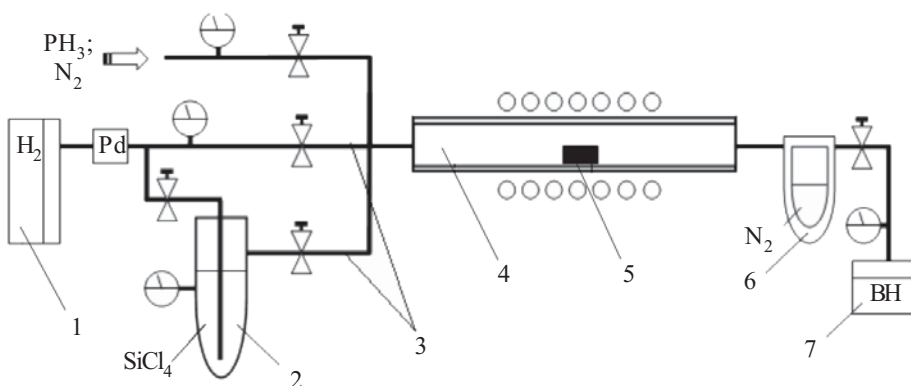


Рис. 1. Блок-схема установки для выращивания наноразмерных кристаллов:

1 — генератор водорода «КЕНГО 14.10»; 2 — барботер; 3 — система клапанов; 4 — реактор (открытого типа); 5 — тигель с образцом; 6 — азотная ловушка; 7 — вакуумный насос

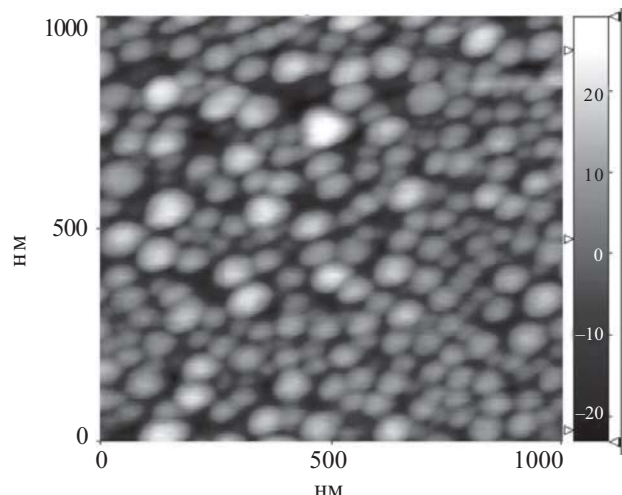


Рис. 2. Распределение нанок капель сплава Si-Au

нию жидкости кремнием и его кристаллизации под каплей. Источник Si, свойства катализатора и природа подложки являются определяющими в процессе роста ННК. Металлом-катализатором в данных исследованиях было золото, поскольку из всех обычно используемых металл/Si-катализаторов был выбран сплав Au/Si, имеющий самую низкую температуру эвтектики, что является необходимым условием выращивания тонких ННК Si [3].

Для получения ансамбля ННК Si процесс выращивания предусматривал проведение следующих технологических операций:

- химическая обработка поверхности пластин кремния жидкими травителями;
- напыление металлической пленки;
- выращивание ННК в открытой системе.

Пленки золота получали методом термического испарения материала в вакууме с учетом всех необходимых условий нанесения пленок в установке вакуумного распыления.

Для исследования процесса выращивания ННК Si на кремниевую подложку ориентации $\langle 100 \rangle$ были напылены пленки золота разной толщины — от 3 до 10 нм. Исследования с помощью атомно-силового микроскопа показали, что структура пленок была однородна. После термообработки подложек при температуре 600°C произошла коагуляция золота в капли (рис. 2). Средний диаметр капель сплава Si-Au существенно зависит от толщины пленок золота и уменьшается от 100 до 40 нм с уменьшением толщины пленки с 9 до 4 нм.

Процесс выращивания ННК Si на кремниевых подложках проводился при температуре 580°C и давлении газовой смеси около 100 мм рт. ст. Время роста составляло 5 мин.

Микрофотография полученного ансамбля ННК Si представлена на рис. 3.

В одной из первых работ по использованию ННК с $p-n$ -переходом в качестве ФЭП было проведено исследование его оптических свойств [4]. Сравнение спектров поглощения кремниевого ФЭП, в котором в качестве антиотражающей поверхности используется структура на основе низкоразмерных кристаллов, и

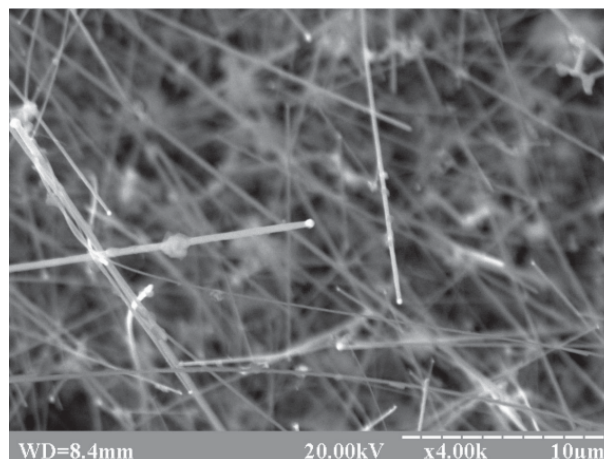


Рис. 3. Ансамбль ННК Si на кремниевой подложке

ФЭП с другими структурами показывает значительное увеличение поглощения первого в спектральном диапазоне 300—1100 нм (рис. 4). С учетом поглощения такие структуры имеют величину фототока 1,2 мА/см². При этом КПД таких ФЭП составляет 2—3%, что связано с наличием поверхностных состояний, которые не могут быть полностью пассивированы из-за высокой плотности нанопроволок. Кроме того, за счет сильно развитой поверхности происходит существенная рекомбинация носителей, что значительно снижает эффективность преобразования энергии. На сегодня эффективность преобразования энергии солнечных элементов на основе нанопроволок кремния составляет лишь 2%, а на основе мульткристаллического кремния — 22—24%, однако существует ряд технологически конструктивных подходов к повышению эффективности преобразования энергии солнечных элементов, в частности пассивирование поверхности антиотражающего покрытия ансамблей нанопроволок.

В предлагаемом технологическом процессе получения кремниевых ФЭП с использованием нано-

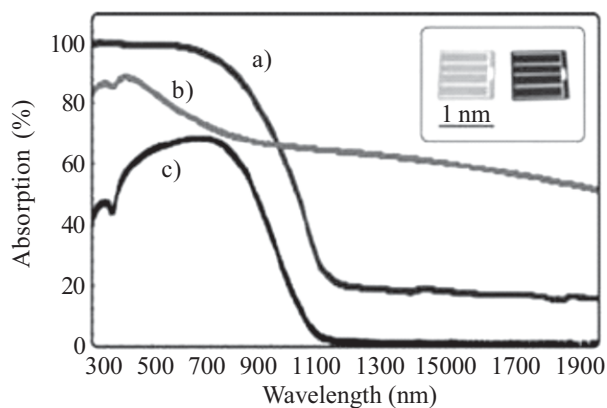


Рис. 4. Спектр поглощения антиотражающей поверхности ФЭП на основе вертикально ориентированных ННК Si, полученных жидким травлением (a) и методом CVD (b), а также тонкопленочных кремниевых структур (c) [2]

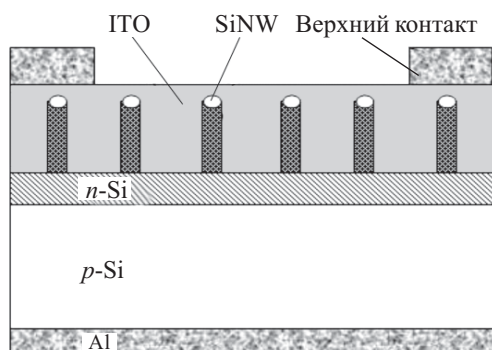


Рис. 5. Схема конструкции ФЭП с ансамблем ННК Si: *p*-Si — пластина кремния (тело ФЭП); *n*-Si — *p*-*n*-переход; SiNW — кремневые нанокристаллы; ITO — прозрачный проводящий контакт; Al — нижний контакт

структур на фронтальной поверхности можно выделить следующие основные этапы (рис. 5):

- создание диффузионного *p*-*n*-перехода легированием пластин кремния *p*-типа из твердых планарных источников фосфора. Процесс диффузии осуществляется при температуре 950°C и обеспечивает формирование профиля легирования высотой около 1 мкм;

- на поверхность сформированного *p*-*n*-перехода наносится тонкая (4 нм) пленка золота для последующего прогрева пластины в вакууме до коагуляции золота в капли и формирования зародышей ННК;

- выращивание ННК Si в открытой водородной системе с использованием SiCl₄ в качестве источника ростового материала;

- путем напыления пленки Al и последующего отжига при температуре 380°C создается контакт к *p*-области ФЭП;

- формируются токособирающие контактные дорожки золота в *n*-области *p*-*n*-перехода.

Таким образом, предложенный метод создания кремневых фотоэлектрических преобразователей с использованием в качестве антиотражающего покрытия ансамблей нанопроволок кремния позволяет значительно увеличить поглощающую способность преобразователей. При этом невысокое значение эффективности преобразования солнечной энергии можно увеличить за счет дополнительных технологических приемов создания пассивирующих слоев.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Perraud S., Poncet S., Levis M. et al. Full process for integrating silicon nanowire arrays into solar cells // *Solar Energy Materials & Solar Cells.*— 2009.— Vol. 93.— P. 1568—1571.
2. Kayes B. M., Atwater H. A., Lewis N. S. Comparison of the device physics principles of planar and radial p-n junction nanorod solar cells // *J. Appl. Phys.*— 2005.— Vol. 97.— P. 114302—114310.
3. Gunawan O., Guha S. Characteristics of vapor-liquid-solid grown silicon nanowire solar cells // *Solar Energy Materials & Solar Cells.*— 2009.— Vol. 93.— P.1388—1393.
4. Tsakalakos L., Balch J. et al. Silicon nanowire solar cells // *Appl. Phys. Lett.*— 2007.— Vol. 91.— P. 233117—233119.
5. Schaller R. D., Agronovich V. M., Klimov V. I. High-efficiency carrier multiplication through direct photogeneration of multi-excitons via virtual single-exciton states // *Nature physics.*— 2005.— Vol. 1.— P. 189—194.
6. Гиваргизов Е. И. Рост нитевидных и пластинчатых кристаллов из пара.— М.: Наука, 1977. [Givargizov E. I. Moscow. Nauka. 1977]
7. Druzhinin A., Ostrovskii I. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD // *Phys. Stat. Sol. (C).*— 2004.— Vol. 1, N 2.— P. 333—336.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Успехи нанотехнологии: электроника, материалы, структуры Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона.— М.: Техносфера, 2011.— 496 с.

Новейшие технологии включают в себя разработку, описание, а также производство и практическое использование самых разнообразных наноразмерных структур, устройств и систем. В междисциплинарном поле этой области исследований пересекаются и перекрываются экспериментальные и теоретические разработки химиков, физиков, инженеров-электронщиков, механиков, материаловедов, биохимиков, молекулярных биологов. Именно сочетание различных подходов и методов является характерной особенностью наиболее интересных и многообещающих разработок в нанотехнологиях.

Книга представляет собой сборник последних результатов, полученных молодыми английскими учеными, многие из которых были стипендиатами Королевского общества или Исследовательского совета инженерных и физических наук Великобритании.

