

РАДИАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

А.Н. Довбня, В.П. Ефимов, А.С. Абызов

Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”,
Харьков, Украина

E-mail: yefimov@kipt.kharkov.ua

Рассматривается влияние радиационного фактора на создание кластерных образований при формировании в кремниевых структурах проводящих наноразмерных нитей для управления носителями тока в Si-фотозлектропреобразователях.

ВВЕДЕНИЕ

В фотозлектрических преобразователях, работающих в условиях космического пространства, со временем под воздействием жесткого корпускулярного излучения накапливаются нарушения в структуре c-Si-кристаллов, приводящие к уменьшению КПД солнечных батарей и снижению энергообеспечения космических объектов. Решением данной проблемы является создание наноразмерных проводящих нитей в структуре c-Si-полупроводника для увеличения сбора носителей тока, генерируемых фотонами широкого спектра солнечного излучения. При радиационной обработке кремниевых материалов происходит локальное преобразование кристаллической структуры в аморфное состояние, что позволяет создавать направленные наноразмерные проводящие нити в объеме кристалла. По окончании процесса градиентного смещения атомов легирующей примеси остаточное радиационное разупорядочение атомов решетки устраняется отжигом ее структуры. Дополнительный вывод носителей тока из объема кремниевого солнечного элемента по массиву наноразмерных проводящих нитей позволяет увеличить КПД солнечных батарей и эффективный срок эксплуатации космических объектов. Энергетические характеристики солнечных батарей (СБ) определяются полупроводниковым материалом, конструктивными особенностями солнечного элемента, величиной КПД и их количеством в батарее. Наиболее используемыми энергоустановками космических объектов являются СБ (~ 80 %) на основе кремния (см. Табл. 1) [1]. В качестве материала солнечных элементов выбран кремний как наиболее изученный, экологически чистый, легко доступный и широко распространенный элемент в земной коре, что и определяет сравнительно низкую себестоимость широкомасштабного его производства.

Таблица 1

Параметры промышленных солнечных батарей

| Материал | КПД, % | P, Вт/м ² | | | | | |
|----------------|--------|----------------------|-------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|
| | | Необлученные | | Облученные флюенсом электронов 1 МэВ | | | |
| | | 28°C | 50°C | 3·10 ¹⁴ э/см ² | 50°C | 1·10 ¹⁵ э/см ² | 50°C |
| Si | 14,8 | 170,9 | 149,5 | 129,0 | 112,2 | 113,0 | 98,8 |
| GaAs | 18,5 | 218,1 | 208,2 | 188,1 | 179,6 | 166,8 | 159,3 |
| GaInAs-GaAs-Ge | 21,5 | 253,5 | 242,8 | 223,0 | 211,9 | 192,7 | 183,0 |

1. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Наличие микро- и наноструктур позволяет решить проблему, возникающую при традиционном способе производства фотоэлементов и связанную с процессом поглощения солнечного излучения в структуре материала и сбором носителей заряда из его объема. Для увеличения КПД ведутся разработки кремниевых фотозлектрических преобразователей с вертикальными и параллельными мультипереходами (Рис.1-4) [2-3] и с проводящими наноструктурами в объеме легированного кремниевого полупроводника в планарном исполнении р-п-перехода [4]. В классической геометрии эффективность солнечных элементов ограничена низкой диффузионной длиной неосновных носителей заряда. Массивы наноразмерных структур для увеличения конверсионной эффективности являются основным фактором и формируются радиационными процессами, которые описываются моделью термического пика и “кулоновского взрыва”.

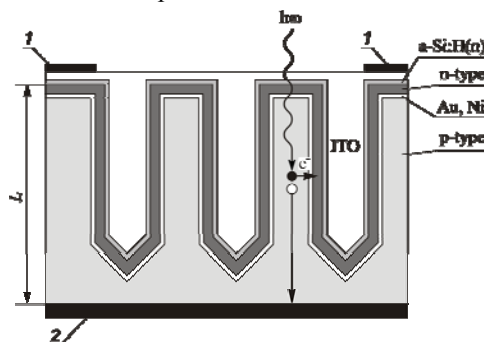


Рис.1. Схема кремниевого фотопреобразователя вертикальной конфигурации с микропроводами (California Institute of Technology, USA):

1 – фронтальный контакт; 2 – тыльный контакт;
L – толщина ячейки фотопреобразователя

Массив выстроенных микропроводов создает возможность увеличения вывода носителей заряда (НЗ) с малой диффузионной длиной на коллектор солнечного элемента (СЭ). Диаметр микропровода должен составлять не менее нескольких сотен нанометров, а длина – десятки микрон для наибольшего поглощения фотонов из солнечного спектра. Для выращивания микропроводов используется VLS-метод (vapor-liquid-solid) с металлическим катализом (Рис.2, 3).

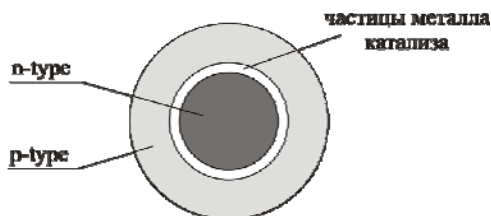


Рис.2. Шунтирование p-n-переходов металлом катализа в процессе роста кремниевых микропроволок в фотопреобразователях с коаксиальным исполнением

Однако наличие металлической проводимости может наложить ограничение на применимость этого метода в фотовольтаике [2].

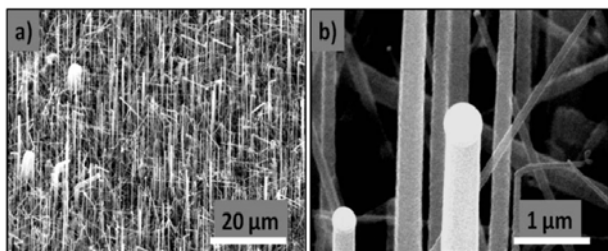


Рис.3. Типичный пример Si-микропроволок, выращенных на основе SiH₄

При решении проблемы уменьшения оптической толщины в многопереходных кремниевых СЭ с параллельными диодными ячейками (Рис.4) [3] может быть также решена задача эффективного сбора фотогенерированных носителей заряда. При большом количестве переходов происходит их взаимное шунтирование, и снижение напряжения на переходах не компенсируется частичным увеличением выходного тока.

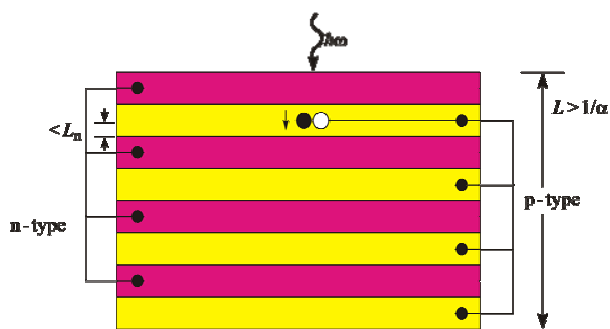


Рис.4. Схема солнечного элемента с параллельными мультипереходами

Поэтому эффект уменьшения оптической толщины в c-Si-СЭ является определяющим в сокращении числа p-n-переходов. Комбинация нанофотонных эффектов позволит увеличить поглощение широкополосного спектра солнечного излучения. Идея управления фотонами существенна для развития следующего поколения фотоэлектрических устройств.

2. МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

С целью увеличения КПД солнечных элементов в объеме их структур создается массив наноразмерных проводящих нитей осколками фотоделения ядер урана, по которым из объема полупроводника выводятся носители заряда на электроды внешней элек-

трической цепи фотоэлектропреобразователя (Рис.5). Критерием возникновения скрытого трека считается повышение температуры локальной области кристалла до температуры плавления. Важны также особенности процесса рекристаллизации расплавленных областей. Создание наноразмерных структур зависит от ионизации атомов мишени при попадании в нее тяжелой заряженной частицы с большим энерговыделением. Высокая скорость выделения энергии в электронную подсистему увеличивает вклад процесса ионизации и инициирует образование “кулоновского взрыва”.

Ионы тяжелых масс (осколки ядер урана) характеризуются большой величиной энергетических потерь. Наблюдается сильная зависимость $(dE/dx)_e$ от заряда иона, падающего на мишень (Si-кристалл).

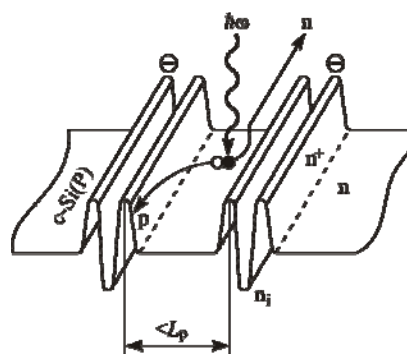


Рис.5. Схема проводящих наноразмерных нитей для стока носителей заряда в эмиттере фотоэлектропреобразователя

Интервал между нитями не должен превышать величину диффузионного смещения (L) неосновных носителей заряда. Для неупругого канала рассеяния энергия ионизационных потерь в веществе хорошо аппроксимируется уравнением Бете-Блоха:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_e = \frac{4\pi Z^2 e^4}{mv^2} AN \ln \frac{2mv^2}{j}, \quad (1)$$

где Z – заряд иона; A – атомный номер мишени; N – число атомов в единице объема; m – масса иона; v – скорость иона; j – потенциал ионизации. Деление ядер урана при энергии возбуждения, незначительно превышающей высоту барьера, является инструментом создания наноразмерных проводящих нитей в легированных c-Si(B,P)-полупроводниках.

Начальный эффективный заряд легких и тяжелых продуктов деления составляет $Z_n=22$, $Z_r=16,7$ единиц заряда. Из тяжелых осколков испаряется в среднем больше нейтронов, чем из легких, поэтому энергия гамма-квантов не должна превышать энергию фотопоглощения в области гигантского дипольного резонанса. Сечение реакции деления ядер урана электронами примерно на два порядка меньше, чем в фото-ядерных реакциях. Угловое распределение осколков фото- и электроделения ядер с $Z \geq 90$ изотропно при энергии возбуждения от 12 до 2 ГэВ.

3. ИОНИЗАЦИЯ ОБЛАСТИ КЛАСТЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

В процессе облучения кристаллов атомы в решетке смещаются от места образования к стокам, оставляя кластер подвижных изолированных вакан-

сий. Именно это обеспечивает накопление дефектов одного знака (вакансий или межузельных атомов) до концентрации образования устойчивых кластеров. Поскольку осколки ядер урана являются малопробежными многозарядными ионами, то без процесса фрагментации структуры нельзя создать скрытые треки на большую глубину (Рис.7). Дислокационная модель строения границ между фрагментами (Табл.2) указывает на наличие у атомов большого количества оборванных и ненасыщенных спиновых связей.

Таблица 2

Определение классификации объектов наносистем

| Фазовое состояние | Единичные атомы | Кластеры | Наночастицы | Компактное вещество |
|-------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Диаметр, нм | 0,1...0,3 | 0,3...10 | 10...100 | Свыше 100 |
| Кол-во атомов | 1...10 | 10...10 ⁶ | 10 ⁶ ...10 ⁹ | Свыше 10 ⁹ |

Распределение смещений атомов зависит от энергетического спектра первично выбитых межузельных атомов с энергией $\varepsilon \geq 5 \dots 20$ кэВ. Энергия бомбардирующих электронов $\varepsilon_0 \geq 10$ МэВ. Концентрация атомов в разупорядоченных областях определяется как $N_{dr} = n_0 \Phi \sigma_{dr}(\varepsilon_0)$, где $n_0 = 5,19 \cdot 10^{22}$ см⁻³; Φ – интегральный поток бомбардирующих электронов с энергией ε_0 ;

$$\sigma_{dr}(\varepsilon_0) = \int_{\varepsilon_{dr}}^{\varepsilon_{max}} \frac{d\sigma(\varepsilon_0, \varepsilon)}{d\varepsilon} d\varepsilon - \text{сечение}$$

рассеяния электронов с порогом образования каскадных процессов.

Потери энергии электронов при прохождении материала кристалла определяются как

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial X} = 2 \left(\frac{M \varepsilon B}{Z / \text{см}^2} \right),$$

где ρ – плотность поглощающего материала. Развитые каскадные процессы образуют стабильные структурные нарушения с укрупненными вакансионными кластерами. Передача энергии от осколков деления валентному электрону атома [5] определяется как

$$\Delta E_e = 4mE_f / M(1 + 4b^2 m^2 E_f^2 / M^2 Z^2 e^4), \quad (2)$$

где e , m – заряд и масса электрона; Z , M , E_f – заряд, масса и энергия осколка; b – прицельное расстояние осколка от атома мишени. Площадь поперечного сечения зарядовой области кластера, созданная осколками ядер урана, составляет $\sim 100 \text{ \AA}^2$. Атомы области кластера теряют свои электроны и при накоплении положительного заряда ионов происходит “кулоновский взрыв”. Это возможно, если энергия электронов превышает кулоновский барьер ($U_c = Z \cdot e^2 / R$), возникающий в результате их притяжения ионами. Полный заряд кластера равен:

$$Z \simeq N = \frac{4\pi}{3} n R^3, \quad (3)$$

где R – радиус кластера; n – концентрация атомов в кластере; N – их полное число.

При $R=b$ формируется наноразмерная нить за счет канала стока заряда, определяемого электриче-

ским полем конденсатора, внутрь которого помещается сборка кристаллов (Рис.6).

Сканирующий пучок электронов заряжает плоский конденсатор, диэлектрической средой которого является кристалл полупроводника. Электрическая емкость конденсатора без учета краевых эффектов записывается в виде $C = \varepsilon_a S / d$, где ε_a – диэлектрическая проницаемость кристалла кремния; S – площадь пластины; d – толщина кристалла.

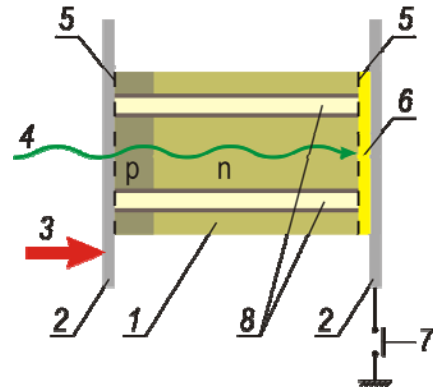


Рис.6. Схема формирования наноразмерных проводящих нитей в структуре кремниевого электроформотребразователя: 1 – монокристаллический, легированный c-Si, (B,P)- полупроводник; 2 – плоский конденсатор; 3 – поток электронов; 4 – поток гамма-квантов; 5 – гребенчатые электроды; 6 – мишень из U-238; 7 – замыкатель; 8 – проводящие нити

При замыкателе 7 в положении “заземлено” проводящие нити 8 ориентированы вдоль электрического поля конденсатора 2 и распространяются на всю глубину кристалла 1. В положении “разомкнуто” проводящие нити находятся под плавающим потенциалом и степень направленности их различна.

Величина разности потенциалов на проводящих пластинах плоского конденсатора записывается в виде $U = qd / \varepsilon_a S$, где q – заряд пластины от сканирующего пучка электронов.

В зависимости от уровня и типа легирования полупроводника в скрытых треках формируются изгибы энергетических зон по управлению носителями заряда.

Для экспериментального обнаружения геометрии скрытых треков облученный образец под плавающим потенциалом подвергался кислотному травлению, в результате чего из латентного трека образуется трек, видимый в сканирующем электронном микроскопе (Рис.7,8). Планарные структуры с проводящими наноразмерными нитями приведены на Рис.9.

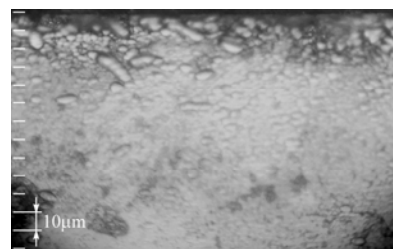


Рис.7. Микрофотография поперечного среза (c-Si)-кристалла без кластерных образований после облучения осколками ядер урана-238

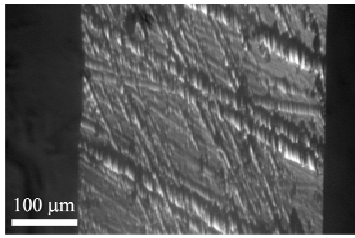


Рис.8. Массив наноразмерных проводящих нитей в структуре кремниевого полупроводника с кластерными образованиями после облучения осколками ядер урана-238

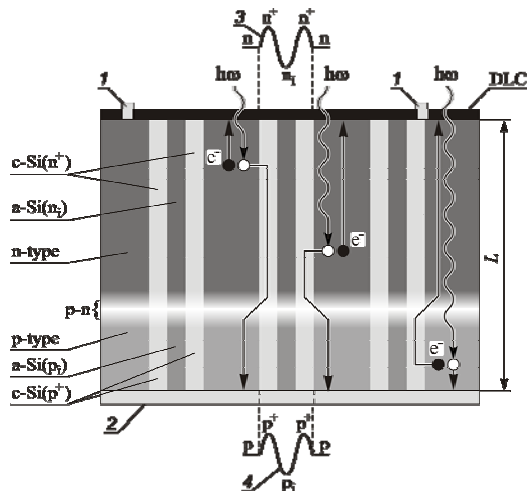


Рис.9. Схема (архитектура) кремниевого электрофотопреобразователя в планарном исполнении с проводящими наноразмерными нитями (ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина): 1 – фронтальный контакт; 2 – тыльный контакт; L – толщина ячейки; 3, 4 – форма проводящей наноразмерной нити в n-p-структурах фотопреобразователя

Электронные пучки для фрагментации структуры легированных кремниевых полупроводников, создания электростатического потенциала в структуре облучения и генерации гамма-квантов для фотоделения ядер урана получены на ускорителе электронов «ЭПОС» НИК «Ускоритель» ННЦ ХФТИ. Сформированные в кремниевом полупроводнике новые структуры, микрофотографии поперечного среза которых приведены в данной работе, получены при финансовой поддержке УНТЦ (Проект УНТЦ №1893).

ВЫВОДЫ

Экспериментально показана возможность создания с помощью радиационных технологий наноразмерных проводящих нитей для вывода носителей заряда из объема кремниевого полупроводника, что обеспечит повышение КПД преобразования солнечного излучения в электрическую энергию в фотоэлектропреобразователях нового поколения. Внешнее электрическое поле, приложенное к полупроводнику с ограниченной величиной удельного сопротивления за счет процесса фрагментации структуры, создает в нем направленный ток утечки, являющийся спусковым механизмом “кулоновского взрыва”. Для формирования наноразмерных проводящих нитей необходимы ионизированные кластерные образования, большой коэффициент диффузии и увеличенная скорость фронта кристаллизации атомов кремния и атомов легированной примеси, что возможно лишь в разупорядоченной структуре, находящейся только в жидкой фазе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ю.Е. Николаенко, В.Ю. Ерохов, Н.М. Вакиев, С.И. Круковский, И.И. Мельник, И.Р. Завербный. Состояние и тенденции развития твердотельных фотопреобразователей солнечной энергии // *Энергетическая микроэлектроника НПП «Карат», НУ «Львовская политехника». Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* 2001, №3, с.21-30.
2. L. Nsakalagos, J. Balch, J. Fronheiser, V.A. Korevaar, O. Sulima, J. Rand. Silicon nanowire solar cells // *Appl. Phys. Lett.* 2007, v.91, p.233117(1)-233117(3).
3. M.A. Green and S.R. Wenham. Novel parallel multi-junction solar cell // *Appl. Phys. Lett.* 1994, v.65(23), p.2907-2909.
4. А.Н. Довбня, В.П. Ефимов, А.С. Абызов, А.В. Рыбка, В.Е. Стрельницкий. Квантовые структуры в фотоэлектрических системах // *Proceedings of International Scientific Conference «Physical and Chemical principles of formation and modification of micro- and nanostructures».* October, Kharkiv, Ukraine. 2009, v.2, p.506-509.
5. R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker. Ion Explosion Spike Mechanism for Formation of Charged – Particle Tracks in Solids // *Journal of Appl. Phys.* 1965, v.36, №11, p.3645-3652.

Статья поступила в редакцию 27.09.2011 г.

RADIATIVE PROCESSES IN SOLAR ENERGETICS

A.N. Dovbnya, V.P. Yefimov, A.S. Abyzov

The effect of the radiation factor for the creation of cluster structures at the formation in nanoscale silicon structures of the conductive filaments to control the charge carriers in Si-photoelectroconverters is considered.

РАДІАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В СОЛЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

А.М. Довбня, В.П. Єфімов, О.С. Абызов

Розглядається вплив радіаційного фактора на створення кластерних утворень при формуванні в кремнієвих структурах провідних нанорозмірних ниток для управління носіями струму в Si-фотоелектроперетворювачах.