

ФОТОПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ С АМОРФНЫМИ ВКРАПЛЕНИЯМИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Введение

Сегодня человечество столкнулось с необходимостью решения долгосрочных энергетических проблем, связанных с близкой перспективой исчерпания традиционных источников энергии и ухудшением экологического состояния Земли. Солнце обеспечивает Землю огромным количеством энергии, которое многократно превышает потребности человечества. Использование этого источника затруднено, потому что солнечное излучение на Земле – это сильно рассеянный небольшой поток энергии. Для массового применения солнечного излучения необходимо обеспечить очень эффективное его использование и значительно улучшить экономические характеристики солнечных элементов. Перспективным подходом в направлении решения проблемы изготовления дешевых преобразователей солнечной энергии является разработка технологии тонкопленочных солнечных элементов на основе аморфного гидрогенизированного и микрокристаллического кремния [1 – 3].

По данным статистики, ежегодный прирост потребления электроэнергии составляет от 2,5 – 4%. Если такая тенденция сохранится, то каждые 25 – 30 лет энергопотребление будет удваиваться. Атомная энергетика в качестве альтернативного источника энергии также не решит глобальных задач энергообеспечения по причинам сложности гарантирования безаварийной работы атомных электростанций, обеспечения экологической безопасности, а также проблем захоронения ядерных отходов.

Идеальным энергетическим газом можно считать водород, который эффективно конвертируется в полезную энергию. При производстве водорода из воды могут быть использованы фотогальванические преобразователи на основе кремния, что позволит создать экологически чистую и непрерывную энергетическую систему (рис.1).

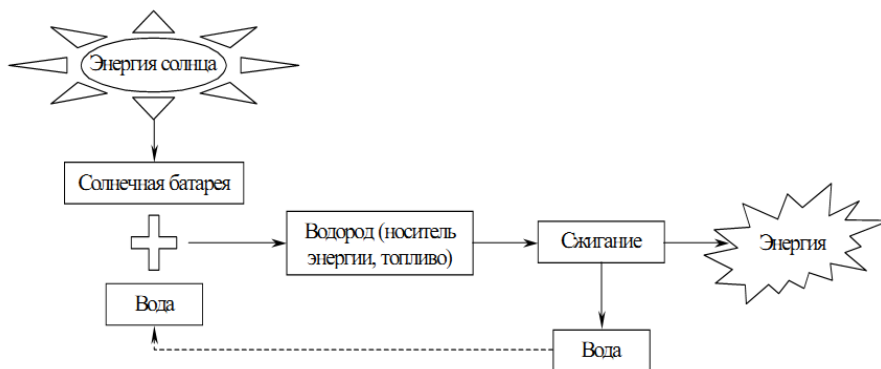


Рис. 1. Схема возможного использования солнечной энергии для производства водорода

Согласно прогнозу Мирового энергетического агентства (IEA), в 2004 – 2030 гг. производство энергии за счет возобновляемых источников возрастет почти в три раза, в том числе солнечной энергии – 60 раз. В современных солнечных энергосистемах более 85 % фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) изготавливают на основе кремниевых пластин, на стоимость которых приходится более 50 % всей стоимости ФЭП [4]. Поэтому очень актуальным остается освоение технологий дешевого кристаллического кремния с высокими эксплуатационными свойствами. Эффективность работы ФЭП зависит от его конструкции, оптических и электрофизических свойств используемого кремния: ширины запрещенной зоны, величины времени жизни неравновесных носителей заряда, степени легирования, коэффици-

ента отражения света от поверхности пластины, спектрального положения основной полосы поглощения солнечного излучения и др.

При попадании света на солнечный элемент фотоны, энергия которых меньше ширины запрещенной зоны, не внося вклад в выходную мощность ФЭП. Если наоборот, то каждый фотон вносит вклад во входную мощность равный ширине запрещенной зоны, а остальная его энергии переходит в теплоту. Для создания ФЭП пригодны полупроводниковые материалы с шириной запрещенной зоны 1-2 эВ.

Полупроводниковый кремний в зависимости от кристаллической структуры имеет разную величину ширины запрещенной зоны:

- 1,1 эВ – кристаллический (моно- и поли-);
- 1,7 – 1,9 эВ – аморфный (пленки толщиной 1 мкм, осаждаемый из газовой фазы на подложку в процессе разложения моносилана);
- 1,45 эВ – монокристаллический (пленки поликристаллического кремния с размером зерна 1 – 50 нм, осаждаемые из газовой фазы).

Таким образом, при создании ФЭП для наземной фотоэнергетики могут быть использованы практически все виды кремния достаточно высокой степени чистоты. Технологическое направление уменьшения удельной стоимости связано с сокращением издержек производства солнечных элементов и увеличением эффективности преобразования солнечной энергии. Одним из перспективных направлений повышения последней является расширение спектра поглощаемых фотонов в длинноволновую область путем оптимизации спектра полупроводникового материала при использовании технологий на основе молекулярно-лучевой эпитаксии. Существует метод создания высокоэффективных солнечных элементов на основе применения материалов с промежуточной зоной. Такие солнечные элементы основаны на электронных и оптических свойствах так называемого материала с промежуточной зоной, для которого характерно существование набора энергетических состояний внутри запрещенной зоны традиционного полупроводника.

Постановка задачи

Объединение электрических и оптических свойств в наноструктурах аморфного кремния является базовым условием для создания устройств светового переизлучения. Гидрированная аморфная с микрокристаллической структурой тонкая пленка создается методом химического осаждения паров из газовой фазы, получаемой в плотной водородной плазме или в высокотемпературном реакторе. Проблема повышения эффективности (с-Si) – фотоэлементов состоит из двух частей: переизлучение коротковолновых фотонов в область края видимого спектра через механизм прямых оптических переходов зона-зона в моногидриде кремния и эффективный вывод фотогенерируемых носителей заряда по всему спектру солнечного излучения. Сложность в том, что в аморфных кремниевых структурах дрейфовая подвижность заряда очень низкая.

Пористый кремний, который получают электрохимическим травлением пластин монокристаллического кремния (с-Si) в растворах плавиковой кислоты, представляет собой ансамбли связанных между собой кремниевых нанокристаллов. В зависимости от размера пор пористый кремний подразделяют на микропористый (< 2 нм), мезопористый (2-50 нм) и макропористый (>50 нм). Пористый кремний имеет большую эффективную поверхность ($200 \text{ м}^2/\text{см}^3$), поэтому влияние внешних факторов, например светового излучения, может привести к значительному изменению концентрации носителей заряда и фотопроводимости [5 – 7]. В работе исследуется фотопроводимость кристаллического кремния со сферическими вкраплениями аморфного кремния.

Фотопроводимость кристаллического кремния с аморфными включениями

Вначале определим существенные отличия аморфного кремния от кристаллического кремния со сферическими вкраплениями аморфного кремния. Аморфный кремний характе-

ризуется отсутствием пространственного упорядочивания атомов. В другом случае аморфные сферические включения внедрены в кристаллическую кремниевую матрицу. Ключевое их отличие заключается в наличии большого числа гетерограниц, т.е. предлагаемую структуру можно рассматривать как материал, обладающий пространственно неоднородными свойствами кристаллического и аморфного кремния. Наличие гетерограниц с дефектами приводит к появлению внутренних электрических полей, влияющих на электрический транспорт носителей заряда в структуре, но не сказывающихся на электрохимический потенциал структуры в целом.

Рассмотрим модель полупроводника *n*-типа, в котором равномерно расположены сферические включения аморфного кремния радиусом r_0 и средним расстоянием между центрами включений $2R$. Принимаем, что на полупроводник попадает световое излучение, которое образует электронно-дырочные пары, количество которых не зависит от координаты и скорость генерации равна G . Вследствие рекомбинации фотоносителей на поверхности включений в полупроводнике устанавливается неоднородное распределение фотоносителей и происходит диффузия фотоносителей к включениям. Для определения пространственного распределения концентрации носителей Δp для случая сферической симметрии в области $r_0 \leq r \leq R$ необходимо решить стационарное одномерное уравнение непрерывности

$$\frac{d^2 \Delta p}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\Delta p}{dr} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = -\frac{\tau_p G}{L_p^2} \quad (1)$$

с граничными условиями на поверхностях включений

$$\frac{d\Delta p(r_0)}{dr} = \frac{\tau_p S}{L_p^2} \Delta p(r_0); \quad \frac{d\Delta p(R)}{dr} = 0, \quad (2)$$

где Δp – концентрация избыточных дырок; L_p – диффузионная длина пробега дырок (10^{-7} м); τ_p – время жизни дырок (10^{-6} с); S – скорость поверхностной рекомбинации, которая зависит от состояния включений.

Первое граничное условие описывает рекомбинацию носителей на поверхности аморфных включений, а второе – основано на предположении максимальной концентрации фотоносителей по центру между включениями.

Выражение для скорости генерации электронно-дырочных пар в общем случае для образца произвольной конечной толщины имеет вид [8]

$$G = \frac{k \cdot \beta \cdot I_0 (1 - R)}{h \cdot \nu \cdot [1 - R^2 \cdot \exp(-2kh)]} \cdot [\exp(-kh) + R \cdot \exp[-k(2h - x)]], \quad (3)$$

где I_0 – интенсивность светового потока; R – коэффициент отражения света от поверхности образца; k – коэффициент поглощения, который характеризует поглощательную способность материала; β – коэффициент квантового выхода, который показывает, сколько электронно-дырочных пар создает один поглощенный фотон.

Решая уравнение (1) с граничными условиями (2) были определены зависимости фотопроводимости кристаллического кремния со сферическими включениями аморфного кремния от радиуса включений и расстояния между ними для разных значений скорости поверхностной рекомбинации (рис. 2) и разных длин волн возмущающего светового излучения (рис. 2, 3).

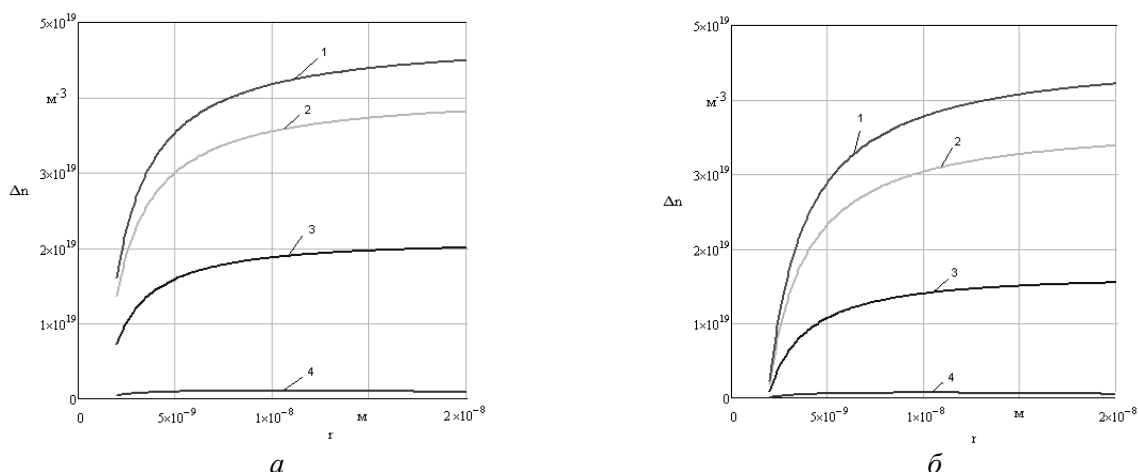


Рис. 2. Зависимости фотопроводимости от радиуса сферических аморфных вкраплений для разных значений скорости поверхностной рекомбинации $S = 10 \text{ м/с}$ (а) и $S = 100 \text{ м/с}$ (б) при длине волны излучения 1 мкм (1 – $R = 7 \times 10^{-8} \text{ м}$, 2 – $R = 5 \times 10^{-8} \text{ м}$, 3 – $R = 3 \times 10^{-8} \text{ м}$, 4 – $R = 1 \times 10^{-8} \text{ м}$)

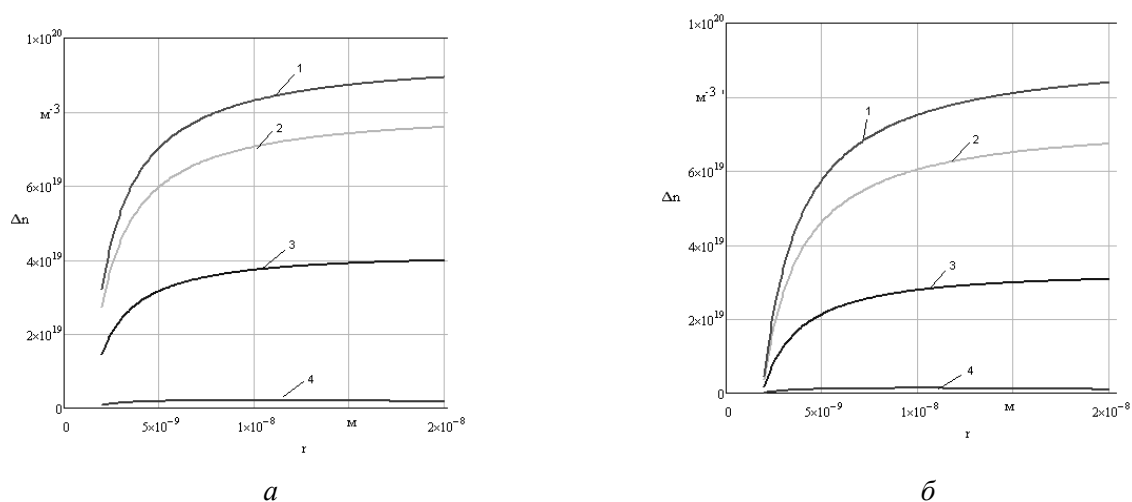


Рис. 3. Зависимости фотопроводимости от радиуса сферических аморфных вкраплений для разных значений скорости поверхностной рекомбинации $S = 10 \text{ м/с}$ (а) и $S = 100 \text{ м/с}$ (б) при длине волны излучения $0,7 \text{ мкм}$ (1 – $R = 7 \times 10^{-8} \text{ м}$, 2 – $R = 5 \times 10^{-8} \text{ м}$, 3 – $R = 3 \times 10^{-8} \text{ м}$, 4 – $R = 1 \times 10^{-8} \text{ м}$)

Выводы

Таким образом, в работе определено, что фотопроводимость кристаллического кремния со сферическими вкраплениями аморфного кремния увеличивается с ростом расстояния между вкраплениями и их радиусом. Также с увеличением скорости поверхностной рекомбинации фотопроводимость структуры уменьшается.

Список литературы: 1. Алфёров, Ж.И., Андреев, В.М., Румянцев, В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftp/2004/08/p937-948.pdf> // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, вып. 8. – С. 937-948. 2. Dovbnya, A.N., Yefimov, V.P. Radiation Technologies in Formation of the Condensed State of Atomic Structure in Crystal Materials (Physical Methodology for Radiation Process Development) // Telecommunications and Radio Engineering. – 2008. – Vol. 67. – P. 1805-1826. 3. Jef Poortmans, Vladimir Arkhipov. Thin Film solar cell: fabrication, characterization and applications. – Wiley series in materials for electronic & optoelectronics application, 2006. – 504р. 4. Пелевин, О.В., Гришин, В.П. Производство полупроводниковых материалов для перспективных преобразователей солнечной энергии / Итоги науки и техники. Металлургия цветных металлов. – Т.19. – С.3-48. 5. 7. Simons, A. J. Carrier mobility in porous silicon // Properties of porous silicon. Ed. by Canham L. – London : INSPEC, 1997. 8. Бьюб, Р. Фотопроводимость твердых тел. – М. : ИИЛ, 1962.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 18.07.2015