

Литература

1. Юткин, Л.А. Электрогидравлический эффект [Текст] / Л.А. Юткин. – М.: Машгиз, 1975. – 356 с.
2. Коробейников, В.П. Определение формы и параметров фронта ударной волны при взрыве в неоднородной среде [Текст] / В.П. Коробейников, В.П. Карликов // Докл. АН СССР. – 1963. – №6. – С. 1271 – 1274.
3. Ковальчук, В.В. Внутренняя энергия и давление плазмы в канале электрического разряда [Текст] / В.В. Ковальчук, О.И. Лещенко, О.В. Осипенко // Труды Одесского политехнического университета. – 2008. – Вып. 2(30). – С. 228–234.
4. Коробейников, С.М. Зажигание разряда в воде с помощью пузырьков [Текст] / С.М. Коробейников, А.В. Мелехов, А.С. Бесов // Теплофизика высоких температур. – 2002. – Т. 40, №5. – С. 120-127.
5. Nigmatulin, R.I. Dynamics, heat and mass transfer of vapor–gas bubbles in liquid [Текст] / R.I. Nigmatulin, N.S. Khabeev, F.B. Nagiev // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1981. – Vol.24, №6. – Pp.1033–1041.
6. Мельников, И.П. Предпробойное развитие электрического разряда в водных электролитах [Текст]: автореф. дис. канд. физ.–мат. наук / И.П. Мельников. – Л., 1969. – 16 с.
7. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity [Текст] // Phil. Mag. – 1917. – Vol.34. – Pp.94–98.
8. Долинский, А.А. Теоретическое обоснование принципа дискретно–импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька [Текст] / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий // Пром. теплотехника. – 1995. – Т.17, №5. – С. 3–28.
9. Яхно, О.М. Математична модель динаміки росту парової фази (перенесення теплоти у рідині, зміна зовнішнього тиску, вплив теплофізичних параметрів, поля швидкостей і тиску біля бульбашки) [Текст] / О.М Яхно, В.Р. Кулінченко, В.Л. Зав'ялов, Т.Г. Мисюра // Технологія і техніка друкування. Збірник наукових праць НТУУ «КПІ». – 2006. – Вип. №3(13). – С. 49–58.
10. Долинский, А.А. Теоретическое обоснование принципа дискретно–импульсного ввода энергии. II. Модель динамики ансамбля паровых пузырьков [Текст] / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий // Пром. теплотехника. – 1996. – Т.18, №1. – С. 3–20.

УДК 621.383.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТРЕХПЕРЕХОДНЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ АМОРФНОГО И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

С. Н. Чеботарев

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

E-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

А. С. Пашченко

Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник*

E-mail: as.pashchenko@gmail.com

М. Л. Лунина

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Лаборатория солнечной энергетики**

E-mail: MarinaSchaz@rambler.ru

В. А. Ирха

Ведущий инженер

Общество с ограниченной ответственностью специальное

конструкторско-технологическое бюро «Инверсия»

ул. Зорге, 7, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

E-mail: v-irx@rambler.ru

*Лаборатория кристаллов и структур для твердотельной электроники

**Южный научный центр Российской академии наук

пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону, 344006, Россия

Запропонована конструкція тонкоплівкового трьохперехідного фотоперетворювача на основі гідрованих і оксидованих шарів мікрокристалічного і аморфного кремнію $\alpha\text{-Si:H}(n\text{-i-p})/\mu\text{s-SiO:H}(n\text{-i-p})/\mu\text{s-Si:H}(n\text{-i-p})$. Результати чисельного моделювання вказують на можливість досягнення 16% ККД

Ключові слова: трьохперехідний тонкоплівкий фотоперетворювач, аморфний і мікрокристалічний кремній, чисельне моделювання

Предложена конструкция тонкопленочного трехпереходного фотопреобразователя на основе гидрированных и оксидированных слоев микрокристаллического и аморфного кремния $\alpha\text{-Si:H}(n\text{-i-p})/\mu\text{s-SiO:H}(n\text{-i-p})/\mu\text{s-Si:H}(n\text{-i-p})$. Результаты численного моделирования указывают на возможность достижения 16% КПД

Ключевые слова: трехпереходный тонкопленочный фотопреобразователь, аморфный и микрокристаллический кремний, численное моделирование

1. Введение

Фотопреобразователи (ФЭП) на основе моно- и поликристаллического кремния занимают более 85% мирового рынка наземной солнечной энергетики. Наибольшей эффективностью преобразования солнечного излучения обладают монокристаллические кремниевые ФЭП (с-Si) [1]. Основной недостаток с-Si ФЭП заключается в значительном расходе высокочистого монокристаллического кремния, большая часть которого выполняет роль пассивной подложки. Для уменьшения себестоимости кремниевых ФЭП используются микрокристаллические (μс-Si:H) [2] и аморфные (α-Si:H) [3] кремниевые слои-поглотители толщиной 0.1-3 мкм. Ранее нами [4, 5] проведено численное моделирование функциональных характеристик солнечных элементов на основе монокристаллического кремния и A³B⁵. В работе [6] продемонстрирована экспериментальная возможность получения моно- и поликристаллических кремниевых микро- и нанослоев.

2. Цель и задачи исследования

Цель настоящей статьи состоит в численном моделировании трехпереходного ФЭП α-Si:H/μс-SiO:H/μс-Si:H. Задачами исследования являются: 1) разработка физической модели трехпереходных ФЭП содержащих слои μс-Si:H, μс-SiO:H и α-Si:H; 2) создание компьютерной программы для численного моделирования функциональных характеристик ФЭП; 3) демонстрация возможности повышения КПД ФЭП путем введения гидрированно-окисленного микрокристаллического слоя кремния.

3. Физическая модель трехпереходных ФЭП α-Si:H/μс-SiO:H/μс-Si:H

Для моделирования характеристик ФЭП на основе μс-Si:H, μс-SiO:H и α-Si:H разработана компьютерная программа, работающая в среде MatLab. Подобно имеющимся программам моделирования ФЭП на основе с-Si (например, AMPS-1D [7]) предложенная нами программа также основана на решении системы дифференциальных уравнений, состоящих из уравнения Пуассона, уравнений непрерывности и переноса носителей заряда. Однако при моделировании электрических и фотоэлектрических свойств аморфного и микрокристаллического кремния необходимо учитывать принципиальное отличие свойств этих материалов от свойств монокристаллического кремния. Описанию таких отличий и принятых допущений и будет посвящен настоящий раздел.

Для полноты рассмотрения принятой модели приведем стандартную систему уравнений, используемую для численного моделирования полупроводниковых многослойных электрических устройств [8].

Уравнение Пуассона:

$$\text{div grad } \phi = -\frac{\rho}{\epsilon\epsilon_0}, \tag{1}$$

где φ – электрический потенциал, ρ – объемная плотность заряда, ε – диэлектрическая проницаемость, ε₀ – диэлектрическая постоянная.

Система уравнений непрерывности для электронов и дырок:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \text{div } \bar{j}_n - R_n + G, \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \text{div } \bar{j}_p - R_p + G, \tag{3}$$

где t – время, e – заряд электрона, n и p – концентрации электронов и дырок, \bar{j}_n и \bar{j}_p – плотности электронного

и дырочного тока, R_n и R_p – скорости рекомбинации электронов и дырок, G – скорость генерации электронно-дырочных пар.

Система уравнений переноса для электронов и дырок:

$$\bar{j}_n = -en\mu_n \text{grad } \phi + eD_n \text{grad } n, \tag{4}$$

$$\bar{j}_p = -ep\mu_p \text{grad } \phi - eD_p \text{grad } p, \tag{5}$$

здесь μ_n и μ_p – подвижности электронов и дырок в слоях, D_n и D_p – коэффициенты диффузии электронов и дырок.

Для решения уравнений (1) - (5) необходимо кроме граничных условий определить плотности состояний g(E) в аморфном и микрокристаллическом кремнии, а также процессы фотогенерации и рекомбинации носителей заряда, в том числе и на границах контактирующих слоев.

Электрические и оптические свойства кристаллических материалов зависят от плотности энергетических состояний g(E), определяемой параметрами решетки и типом атомов. В аморфных материалах кристаллическая периодичность отсутствует. Зонная структура α-Si:H отличается от зонной структуры монокристаллического кремния [9]. Внутри запрещенной зоны α-Si:H существует так называемая зона подвижности носителей заряда. В отсутствие дальнего порядка плотность состояний на границах зоны увеличивается, а не обрывается, как это имеет место для монокристалла. Эти пограничные области называют областями Урбаха (*Urbach tails*). Помимо состояний на границах валентной зоны E_v и зоны проводимости E_c в α-Si:H существуют также дополнительные состояния, локализованные внутри запрещенной зоны E_g. Эти состояния называют межзонными распределенными ловушками носителей заряда. Они бывают двух типов. Первый тип ловушек захватывает электроны и не влияет на движение дырок (*донорноподобные ловушки*); второй тип ловушек захватывает дырки и не оказывает воздействия на электроны (*акцепторноподобные ловушки*). Плотность состояний в аморфном кремнии g(E) определяется суммой плотностей состояний Урбаха и внутризонных ловушек:

$$g(E) = g_D^{\text{Urbach}}(E) + g_A^{\text{Urbach}}(E) + g_D^{\text{Gauss}}(E) + g_A^{\text{Gauss}}(E). \tag{6}$$

Плотности состояний Урбаха на границах зоны проводимости и валентной зоны описываются экспоненциальными выражениями:

$$g_D^{Urbach}(E) = g_{D0}^{Urbach} \exp\left[\frac{E_V - E}{E_D}\right], \quad (7)$$

$$g_A^{Urbach}(E) = g_{A0}^{Urbach} \exp\left[\frac{E - E_C}{E_A}\right], \quad (8)$$

где $g_{D0}^{Urbach}(E)$ и $g_{A0}^{Urbach}(E)$ - плотность состояний Урбаха на границах зоны проводимости и валентной зоны, E_D и E_A - характеристические энергии донорноподобных и акцепторноподобных состояний.

Плотность глубоких состояний внутри запрещенной зоны подчиняются распределению Гаусса:

$$g_D^{Gauss}(E) = \frac{N_D^{Gauss}}{\omega_D} \exp\left[-\frac{(E - E_D^{Gauss})^2}{2\omega_D}\right], \quad (9)$$

$$g_A^{Gauss}(E) = \frac{N_A^{Gauss}}{\omega_A} \exp\left[-\frac{(E - E_A^{Gauss})^2}{2\omega_A}\right], \quad (10)$$

где E_D^{Gauss} и E_A^{Gauss} - положение вершин распределений Гаусса для донорноподобных и акцепторноподобных состояний, ω_D и ω_A - стандартные отклонения для распределений Гаусса, N_D^{Gauss} и N_A^{Gauss} - число состояний в вершинах распределений Гаусса.

После определения плотности энергетических состояний $g(E)$ в аморфном кремнии (уравнения (6) – (10)) необходимо задать функцию, определяющую вероятность их заполнения носителями заряда. Введем коэффициент C , характеризующий отношение сечений захвата заряженных ловушек σ_{ch} и нейтральных ловушек σ_{neut} :

$$C = \frac{\sigma_{ch}}{\sigma_{neut}}, \quad (11)$$

Для акцепторноподобных состояний в аморфном кремнии $\sigma_{ch} = \sigma_p$, $\sigma_{neut} = \sigma_n$ (σ_n и σ_p - сечения захвата электронов и дырок) и функция распределения примет вид [10]:

$$f_A(E) = \frac{n + C \cdot N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right]}{n + p \cdot C + C \cdot N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right] + N_C \exp\left[\frac{(E - E_C)}{kT}\right]}, \quad (12)$$

где N_V и N_C - эффективная плотность состояний в валентной зоне E_V и зоне проводимости E_C , k - постоянная Больцмана, T - абсолютная термодинамическая температура.

Для донорноподобных состояний в аморфном кремнии $\sigma_{ch} = \sigma_n$, $\sigma_{neut} = \sigma_p$ и функция распределения определяется аналогичным выражением:

$$f_D(E) = \frac{n \cdot C + N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right]}{p + n \cdot C + C \cdot N_C \exp\left[\frac{(E - E_C)}{kT}\right] + N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right]}, \quad (13)$$

Определив плотность энергетических состояний в запрещенной зоне аморфного кремния можно оценить концентрацию электронов n_{trap} и дырок p_{trap} , захваченных акцепторноподобными и донорноподобными ловушками Урбаха и межзонными распределенными ловушками. Захваченные носители заряда не вносят вклад в электропроводность. Концентрации n_{trap} и p_{trap} определяются концентрациями свободных дырок и электронов:

$$n_{trap} = \int_{E_V}^{E_C} f_A(E) g_A(E) dE, \quad (14)$$

$$p_{trap} = \int_{E_V}^{E_C} [1 - f_D(E)] g_D(E) dE, \quad (15)$$

здесь

$$g_D(E) = g_D^{Urbach}(E) + g_D^{Gauss}(E), \quad g_A(E) = g_A^{Urbach}(E) + g_A^{Gauss}(E).$$

При освещении полупроводника светом с энергией фотонов больше ширины запрещенной зоны наблюдается фотогенерация электронно-дырочных пар. Поглощательная способность материала характеризуется коэффициентом поглощения $\alpha(\lambda)$, представленным на рис. 1 [11].

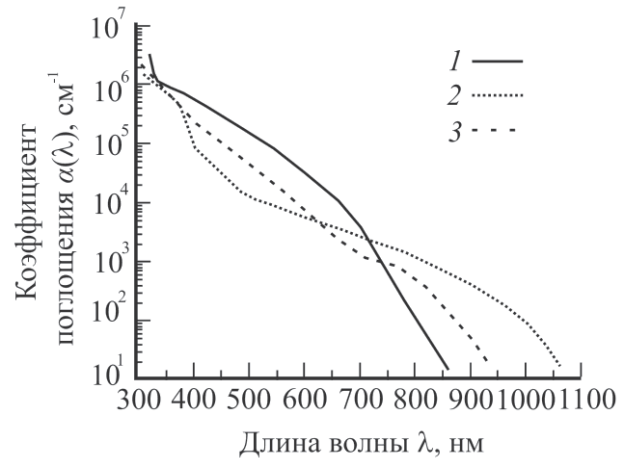


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны: 1 - α -Si:H; 2 - μ c-Si:H; 3 - c-Si

Поток фотонов внутри полупроводника на глубине x (координата отсчитывается от поверхности слоя вглубь) определяется соотношением Бугера-Ламберта:

$$\Phi(x, \lambda) = \Phi_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) \cdot x], \quad (16)$$

Скорость фотогенерации электронно-дырочных пар внутри слоя можно определить как:

$$G(\lambda, x) = -\frac{\partial \Phi(x)}{\partial x} = \alpha(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda) \cdot x], \quad (17)$$

В случае учета отражения от границы слоя это выражение уточняется:

$$G(\lambda, x) = \frac{\alpha(\lambda) \cdot \Phi_0(\lambda)}{1 - P} \left\{ \exp[-\alpha(\lambda) \cdot x] + P \exp[\alpha(\lambda) \cdot x] \right\}, \quad (18)$$

В соответствии с моделью Шокли-Рида-Холла [12] скорости рекомбинации электронов R_n и R_p можно считать равными:

$$R_n(n, p) = R_p(n, p) = C \cdot \nu \sigma_{\text{neut}} (n \cdot p - n_i^2) \times \left\{ \int_{E_v}^{E_c} \frac{g_D(E)}{n \cdot C + p + C \cdot N_C \exp\left[\frac{(E - E_C)}{kT}\right] + N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right]} + \frac{g_A(E)}{n + p \cdot C + C \cdot N_V \exp\left[\frac{(E_V - E)}{kT}\right] + N_C \exp\left[\frac{(E - E_C)}{kT}\right]} \right\} dE, \quad (19)$$

где n_i - собственная концентрация носителей заряда, ν - тепловая скорость движения носителей заряда.

Отметим, что для решения системы уравнений (1) – (5) необходимо также знать плотность электрического заряда ρ . Для α -Si:H эта величина определяется выражением:

$$\rho = e(p - n + p_{\text{trap}} - n_{\text{trap}} + N_D^+ - N_A^-), \quad (20)$$

где N_D^+ и N_A^- - концентрации ионизированных примесных донорных и акцепторных атомов.

Особенность моделирования границы «аморфный – кристаллический» кремний заключается в необходимости учета поверхностной рекомбинации. Плотности электронного и дырочного токов на границе устанавливаются соотношениями:

$$\vec{j}_n \cdot \vec{r}_0 = -e \cdot S_n^{\text{surf}} (n^{\text{surf}} - n_0), \quad (21)$$

$$\vec{j}_p \cdot \vec{r}_0 = e \cdot S_p^{\text{surf}} (p^{\text{surf}} - p_0), \quad (22)$$

здесь \vec{r}_0 - единичный вектор нормали к поверхности, S_n^{surf} и S_p^{surf} - скорости рекомбинации электронов и дырок на рассматриваемой границе, n^{surf} и p^{surf} - концентрации электронов и дырок после пересечения границы.

Вначале определим существенные отличия аморфного кремния от микрокристаллического. Аморфный кремний характеризуется отсутствием пространственного упорядочивания атомов. В микрокристаллическом кремнии кристаллиты Si внедрены в аморфную кремниевую матрицу. Ключевое отличие μ -Si:H от α -Si:H заключается в наличии большого числа гетерограниц, т.е. микрокристаллический кремний можно рассматривать как материал, обладающий пространственно неоднородными свойствами аморфного кремния и монокристаллического кремния. Наличие гетерограниц с дефектами приводит к появлению внутренних электрических полей, влияющих на электрический транспорт носителей заряда в микрокристаллическом кремнии, но не сказывающихся на об-

щей контактной разности потенциалов p - n -перехода. Таким образом, микрокристаллический слой можно заменить комбинацией чередующихся аморфных прослоек и микромонокристаллов кремния. Эксперименты [13] продемонстрировали, что процесс фотогенерации носителей заряда в основном происходит в микрокристаллитах кремния. Поэтому E_g (μ -Si:H) принимается равной E_g (c -Si)=1.12 эВ. Отметим, что для оксидированного μ -Si:O $E_g=1.45$ эВ. В остальном механизм фотогенерации аналогичен описанному. Образующиеся носители заряда движутся в периодической структуре «микрокристаллы – аморфные слои», что макроскопически приводит к изменению значений подвижностей μ_n и μ_p , коэффициентов диффузии D_n и D_p , а также сечений захвата носителей заряда σ_n и σ_p . Эти параметры для каждого конкретного микрокристаллического кремния определяют экспериментальным путем.

Процесс рекомбинации в μ -Si:H и μ -Si:O преимущественно происходит в аморфных прослойках, где имеется высокая плотность состояний $g(E)$. Поэтому для микрокристаллического кремния справедлива модель рекомбинации и захвата носителей заряда аморфного кремния.

Решение уравнений (1) – (5), дополненных соотношениями (6) – (21) проводилось в среде MatLab 7 с помощью разработанной компьютерной программы. Для численного моделирования использовался метод конечных разностей и итерационная схема Ньютона-Рафсона.

4. Типы моделируемых фотопреобразователей

Моделировались три типа ФЭП. Тип I – n - i - p структура на основе μ -Si:H. Тип II – гетероструктура α -Si:H(n)/ μ -Si:H(i)/ α -Si:H(p). Тип III – предлагаемая нами трехкаскадная структура на основе α -Si:H(n - i - p)/ μ -Si:O(n - i - p)/ μ -Si:H(n - i - p), обладающая как это будет показано ниже большей эффективностью преобразования солнечной энергии. Конструкции исследуемых структур представлены на рис. 2. Схематически, в конструкциях структур подложки не изображены, так как предполагалось, что каждая из указанных структур располагается на прозрачной диэлектрической подложке (например, стекле), выполняющей роль несущей конструкции. Между активной фотоструктурой и подложкой имеется гальваническая развязка из прозрачного проводящего оксида. Дополнительные слои со стороны фронтального и тыльного контактов отсутствовали. Общая толщина структур I и II типов не превышала 2.5 мкм, III – 6 мкм.

Для моделирования всех параметров и характеристик ФЭП при освещении использовался нормализованный спектр AM 1.5 с плотностью энергии 100 мВт/см². При получении спектров внешнего квантового выхода (EQE) структуры III - типа внешнее напряжение прямого смещения составляло 0.7 В для верхнего перехода α -Si:H и по 1 В для среднего μ -Si:O и нижнего μ -Si:H переходов. Концентрация доноров и акцепторов в легированных слоях α -Si:H и μ -Si:H не превышала $3 \cdot 10^{19}$ см⁻³, что обусловлено технологическими трудностями получения более высокого уровня легирования. Туннелирование носителей заряда через границу p - n

областей предполагалось несущественным. Последовательное и параллельное сопротивления структуры не учитывались. Температура солнечных элементов не менялась и составляла 300 К. Для контактов использовалась модель идеальных омических контактов. Работы выхода электронов принимались равными 4.05 эВ (для $\mu\text{-Si:H}$) и 3.8 эВ (для $\alpha\text{-Si:H}$).

Скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок S_n и S_p на границе контактов равнялась 10^7 см/с. При моделировании вольтамперной характеристики структуры III-типа плотность тока короткого замыкания определялась путем конволюции полученной зависимости внешнего квантового выхода и спектра АМ 1.5. Затем, по методике [14], определялось напряжение холостого хода и производился расчет остальных параметров структуры (фактора заполнения, КПД). Расчет параметров и характеристик солнечных элементов I – III типов осуществлялся численно.

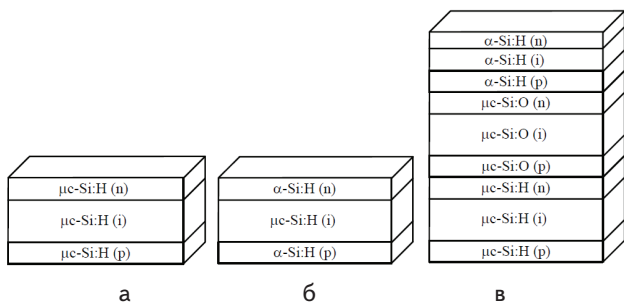


Рис. 2. Конструкции исследуемых ФЭП: а) $\mu\text{-Si:H}(n)/\mu\text{-Si:H}(i)/\mu\text{-Si:H}(p)$; б) $\alpha\text{-Si:H}(n)/\mu\text{-Si:H}(i)/\alpha\text{-Si:H}(p)$; в) $\alpha\text{-Si:H}(n-i-p)/\mu\text{-Si:H}(n-i-p)/\mu\text{-Si:H}(n-i-p)$

5. Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены рассчитанные вольтамперные характеристики образцов I и II-типов. Кривая 1 соответствует $\mu\text{-Si:H}$ ($n-i-p$) солнечному элементу. В $n-i-p$ структуре I-типа величина напряжения холостого хода U_{xx} достигает 0.571 В и обусловлена значением ширины запрещенной зоны. Фактор заполнения ff составил 75.5%. Такой тип структуры имеет весьма низкий КПД и в нашем случае составляет $\eta=7.57\%$. Введение в конструкцию солнечного элемента на основе $\mu\text{-Si:H}$ слоев аморфного кремния позволяет добиться значительного увеличения напряжения холостого хода (кривая 2) за счет увеличения разницы квазиуровней Ферми материалов $\alpha\text{-Si:H}$ ($E_g=1.72$ эВ) и $\mu\text{-Si:H}$ ($E_g=1.12$ эВ).

В ФЭП II-типа плотность тока короткого замыкания несущественно снижается до 17.05 мА/см² и в данном случае лимитируется высокой плотностью межзонных распределенных ловушек носителей заряда в $\alpha\text{-Si:H}$ ($1 \cdot 10^{18}$ см⁻³/эВ). Фактор заполнения ff в структуре II-типа оказался выше и достиг 84%. Эффективность фотоэлектрического преобразования увеличилась на 5.13 % и достигла 12.7%. Результаты моделирования указывают на то, что для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей на основе аморфного и микрокристаллического

кремния необходимо технологически получать слои аморфного кремния высокого качества с плотностью состояний не выше $10^{14}\text{-}10^{16}$ см⁻³/эВ.

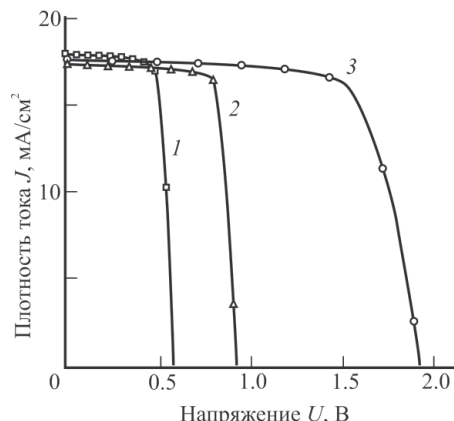


Рис. 3. Зависимости плотности электрического тока от напряжения (вольтамперные характеристики) моделируемых ФЭП I-III типов

Развивая идею гетероструктурных кремниевых ФЭП и используя результаты работы [3], в которой показана возможность получения оксидированного кремния $\mu\text{-Si:O}$ с шириной запрещенной зоны $E_g \approx 1.45$ эВ, нами предлагается конструкция тонкопленочного трехкаскадного ФЭП $\alpha\text{-Si:H}(n-i-p)/\mu\text{-Si:O}(n-i-p)/\mu\text{-Si:H}(n-i-p)$. Моделирование вольтамперной характеристики структуры III-типа (см. рис. 4 – кривая 3) показало, что использование трех каскадов на основе аморфного и микрокристаллического кремния способствует достижению высокого напряжения холостого хода 1.957 В. Фактор заполнения характеристики остается высоким – 78%. Следует отметить, что плотность тока короткого замыкания в трехкаскадной структуре сопоставима с таковой в структуре II-типа и составляет не менее 17 мА/см². Максимальный КПД может достигать 16.3%.

Результаты моделирования спектральной зависимости внешнего квантового выхода каждого каскада структуры и ее интегральное значение для всего ФЭП представлены на рис. 4.

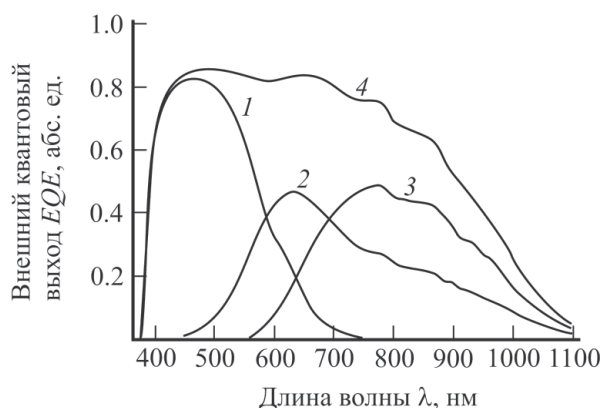


Рис. 4. Зависимости внешнего квантового выхода от длины волны ФЭП, выполненного по $\alpha\text{-Si:H}(n-i-p)/\mu\text{-Si:O}(n-i-p)/\mu\text{-Si:H}(n-i-p)$ архитектуре

В коротковолновой области 400-550 нм α -Si:H каскад (кривая 1) характеризуется высоким внешним квантовым выходом 80%. Средний каскад μ -Si:O(n - i - p) структуры III-типа обладает максимальным квантовым выходом 45% (кривая 2) в красной части спектра (600-700) нм. Нижний каскад μ -Si:H(n - i - p) показывает максимальную чувствительность 42% (кривая 3) в ближней ИК части спектра (700-900) нм. Кривая 4 соответствует интегральному внешнему квантовому выходу ФЭП III-типа. Резкий край зависимости на 400 нм обусловлен малой толщиной фронтального слоя α -Si:H(n). В видимой части спектра наблюдается высокий внешний квантовый выход (более 80%). В связи с наличием градиента ширины запрещенной зоны E_g (1.72-1.45-1.12 эВ) в диапазоне 700-1100 нм зависимость характеризуется плавным уменьшением внешнего квантового выхода до нуля.

6. Выводы

Предложена конструкция и теоретически исследованы функциональные характеристики кремниевых тонкопленочных трехпереходных ФЭП α -Si:

H(n - i - p)/ μ -Si:O(n - i - p)/ μ -Si:H(n - i - p) с использованием разработанной программы. Рассмотрена физическая модель электрических и оптических свойств аморфных и микрокристаллических слоев различного типа проводимости и уровня легирования. Проведенный анализ спектральных зависимостей внешнего квантового выхода трехпереходной структуры показывает, что сочетание α -Si:H и μ -Si:H n - i - p переходов позволяет эффективно использовать различные части солнечного излучения и существенно расширить спектральную чувствительность кремниевых гетероструктурного ФЭП в коротковолновом и ближнем ИК диапазоне. Продемонстрирована возможность достижения КПД кремниевых тонкопленочных трехпереходных ФЭП на уровне 16%. Полученные результаты, являются заделом для дальнейших научных и технологических исследований по разработке высоковольтных кремниевых тонкопленочных ФЭП.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (ГК № 14.516.11.0012).

Литература

- Green, M. A. Solar cell efficiency tables (version 41) [Текст] / M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop // Prog. Photovolt: Res. Appl. - 2013. - Т. 21. - С.1-11.
- Cousins, P. J. Gen III: improved performance at lower cost [Текст] / P.J. Cousins, D.D. Smith, H.C. Luan. // 35th IEEE PVSC, Honolulu, HI. - 2010. - С.112-115.
- Benagli, S. High-efficiency amorphous silicon devices on LPCVD-ZNO TCO prepared in industrial KAI-M R&D Reactor [Текст] / S. Benagli, D. Borrello, E. Vallat-Sauvain // 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Hamburg. - 2009. - С. 234-239.
- Чеботарев, С. Н. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения от толщины и уровня легирования фронтального слоя [Текст] / С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, М.Л. Лунина // Вестник Южного научного центра РАН. - 2012. - Т. 7. - № 4. - С.25-30.
- Лунин, Л.С. Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов [Текст] / Л.С. Лунин, С.Н. Чеботарев, А.С. Пашенко, Л.Н. Болбанова // Неорганические материалы. - 2012. - Т. 48. - № 5. - С.517-522.
- Лунин, Л.С. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb [Текст] / Л.С. Лунин, А.С. Пашенко // Журнал технической физики. - 2011. - Т. 81. - вып. 9. - С. 71-76.
- Fonash, S. A manual for AMPS-1D for Windows 95/NT a one-dimensional device simulation program for the analysis of micro-electronic and photonic structures [Текст] / S. Fonash, J. Arch, J. Ciuffi. - Pennsylvania: Pennsylvania State University Press, 1997. - 126 с.
- Palankovski, V. Analysis and simulation of heterostructure devices [Текст] / V. Palankovski, R.Quay - Wien: Springer-Verlag, 2004. - 289 с.
- Fonash S. Solar cell device physics [Текст] / S. Fonash. - New York: Academic Press, 2010. - 353 с.
- Carlson, D.E. Semiconductors and Semimetals [Текст] / Carlson, D.E. - Amsterdam: Academic Press, 1984. - 385 с.
- Jensen, N. Optimization and characterization of amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells [Текст] / N. Jensen, R.M. Hausner, R.B. Bergmann // Prog. Photovolt: Res. Appl. - 2002. - Т. 10 - С. 1-13.
- Shockley, W. Statistics of the recombination of holes and electrons [Текст] / W. Shockley, W.T. Read. // Phys. Rev. - 1952. - Т. 87. - с. 835.
- Schropp, R.E.I. Amorphous and microcrystalline silicon solar cells - modeling, materials and device technology [Текст] / R.E.I. Schropp and M. Zeman. - Kluwer. Boston/Dordrecht/London, 1998. - 253 с.
- Колтун, М.М. Оптика и метрология солнечных элементов [Текст] / М.М. Колтун - М.: «Наука». - 1985. - 281 с.