

Эффективность преобразования солнечной энергии солнечным элементом на основе Si с квантовыми точками Ge

А. В. Войцеховский, Д. В. Григорьев, О. П. Пчеляков, А. И. Никифоров

Рассмотрена модель солнечного элемента на основе p^+-i-n^+ -Si-структуры, включающей слой квантовых точек Ge в собственной области. Для определения эффективности преобразования солнечного элемента проведен расчет фототока в рассматриваемой p^+-i-n^+ -структуре. В результате расчета дана оценка степени влияния квантовых точек на эффективность преобразования солнечной энергии фотопреобразователя.

PACS; 84.60.Jt; 85.35.Be; 85.60.Bt

Ключевые слова: солнечный элемент, квантовая точка, фототок, эффективность.

Войцеховский Александр Васильевич, директор научно-образовательного центра.

Григорьев Денис Валерьевич, старший научный сотрудник. Сибирский физико-технический институт при ТГУ. Россия, 634050, г. Томск, пл. Новособорная, 1. Тел. (8-3822) 41-35-17. E-mail: vav@elefot.tsu.ru

Пчеляков Олег Петрович, профессор, руководитель отдела. **Никифоров Александр Иванович**, заведующий лабораторией. Институт физики полупроводников СО РАН. Россия, 603090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13. Тел. (8-383) 333-35-02.

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2008 г.

© Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Пчеляков О. П., Никифоров А. И., 2010

Введение

В настоящее время основные тенденции развития солнечной энергетики направлены на уменьшение удельной стоимости фотопреобразователя (ФП), которая определяется отношением стоимости производства ФП к отдаваемой им электрической мощности.

Технологическое направление уменьшения удельной стоимости связано с сокращением издержек производства солнечных элементов. 90 % рынка солнечных элементов занимают ФП на ос-

нове кремния, что обусловлено развитой кремниевой технологией в микроэлектронной промышленности. Однако эффективность ФП на основе кремния составляет ~15 % (эффективность лабораторных образцов ФП не превышает 25 %), что приводит к значительным размерам модулей ФП в составе солнечных батарей, необходимых для выработки требуемой электрической мощности, и ограничивает их применение в системах, требующих компактные автономные источники питания.

Второй путь снижения величины удельной стоимости ФП — это увеличение эффективности преобразования солнечной энергии. Одним из перспективных направлений повышения последней является расширение спектра поглощаемых фотонов в длинноволновую область путем оптимизации энергетического спектра полупроводникового материала при использовании технологий на основе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1]. Так, в последние годы появился новый подход к созданию высокоэффективных солнечных элементов, основанный на применении материалов с промежуточной зоной [2]. 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. Квантовые точки с высокой слоевой плотностью было предложено использовать как средство получения материала с промежуточной зоной, что привело к созданию солнечных элементов с промежуточной зоной с квантовыми точками [3]. По оценкам специалистов компании SCATEC AS, себестоимость электроэнергии, вырабатываемой подобными ФП, уменьшится в два раза [4].

В настоящее время наногетероструктуры на основе кремния с квантовыми точками германия, выращенные методом МЛЭ, становятся новым классом материалов для фотовольтаики [5]. Исследования показали, что в структурах с квантовыми точками (Ge/Si) при поглощении фотонов возможны переходы электронов из валентной зоны в зону проводимости через состояния в промежуточной зоне, образованные локальными энергетическими уровнями квантовых точек [6]. Общая оценка показывает, что предельная эффективность преобразования излучения в электричество для ФП на основе таких материалов может достигать 53 % за счет поглощения излучения в большем интервале длин волн [2].

Цель данной работы — оценка степени влияния квантовых точек на эффективность преобразования солнечной энергии ФП на основе кремниевого $p^+ - i - n^+$ -диода.

Основные положения модели

Рассмотрим модель солнечного элемента на основе кремниевой $p^+ - i - n^+$ -структуры, включающей слои квантовых точек Ge в собственной i -области. Схематическое изображение структуры и зонной диаграммы солнечного элемента приведено на рис. 1. Положим, что квантовые точки с поверхностной плотностью N_S расположены в слоях, периодически повторяющихся N раз с периодом d_L .

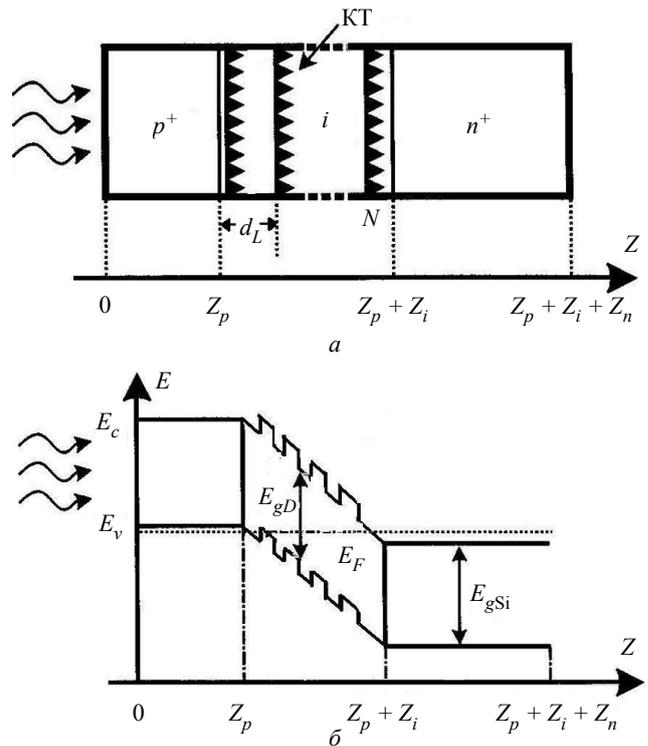


Рис. 1. Модель $p^+ - i - n^+$ -солнечного элемента с квантовыми точками [7]:

a — структура элемента; б — схематическое изображение зонной диаграммы элемента

Будем считать, что локализованные состояния дырок в квантовых точках образуют промежуточную зону, причем все состояния заполнены электронами [2]. В этом случае дополнительное поглощение, связанное с квантовыми точками, определяется эффективной шириной запрещенной зоны E_{gD} (см. рис. 1, б) [7], которая характеризует энергетический промежуток между основным состоянием дырок в квантовой точке Ge/Si и зоной проводимости Si. В работе [6] показано, что в кремниевых структурах с квантовыми точками Ge при среднем их линейном размере 15 нм в основании наблюдается пик поглощения фотонов в спектральном диапазоне 650—850 нм.

Для определения эффективности преобразования солнечного элемента необходимо рассчитать фототок в рассматриваемой $p^+ - i - n^+$ -структуре. Полный фототок определяется суммой соответствующих фототоков в базовых и собственной об-

ластях структуры. Фототок в p -слое солнечного элемента можно найти из решения уравнения для распределения избыточной концентрации неосновных электронов [8]:

$$\frac{d\Delta n(z)}{dz^2} - \frac{\Delta n(z)}{L_n^2} + \frac{G_n(\xi, z)}{D_n} = 0, \quad (1)$$

где L_n и D_n — диффузионная длина и коэффициент диффузии электронов в кремнии, соответственно;

G_n — функция скорости генерации неосновных электронов, определяемая следующим выражением:

$$G_n(\xi, z) = \alpha(\xi)[1 - R(\xi)]F(\xi)\exp[-\alpha(\xi)z],$$

где ξ — энергия фотона;

$\alpha(\xi)$ — коэффициент поглощения Si;

$R(\xi)$ — коэффициент отражения фотонов от фронтальной поверхности;

$F(\xi)$ — поток фотонов, падающих на солнечный элемент.

В дальнейшем при расчетах будем считать, что коэффициент отражения $R(\xi) = 0$, а поток фотонов соответствует спектральному распределению потока фотонов от Солнца в условиях AM0 (air mass = 0, вне атмосферы Земли) [1]. Тогда [9]

$$F(\xi) = \frac{\sin^2 \theta_s}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{2\pi}{h^3 c^2} \cdot \frac{\xi^2}{e^{\xi/k_B T_s} - 1},$$

где $T_s = 5800$ К;

θ_s — полуугол, под которым виден солнечный диск с Земли ($f_s = 1/\sin^2 \theta_s = 46050$);

$X = 1/\sin^2 \theta$ — величина, характеризующая концентрацию солнечного излучения;

h, k_B — постоянные Планка и Больцмана;

c — скорость света.

Граничные условия для уравнения (1) определяются требованием обращения в ноль избыточной концентрации на границе области обеднения $\Delta n(Z_p) = 0$ и скоростью поверхностной рекомбинации S_n на фронтальной поверхности, т. е.

$$D_n \frac{d\Delta n}{dz} \Big|_{z=0} = S_n \Delta n(0).$$

Полный фототок, собираемый p -областью, определяется следующим выражением:

$$J_n^p = \int_0^\infty j_n(\xi) d\xi.$$

Фототок J_n^p , собираемый n -областью, находится аналогично.

При расчете фототока от собственной области с квантовыми точками воспользуемся результатами работы [6]. При рассмотрении процессов погло-

щения фотонов в i -области учтем, что спектральный отклик от квантовых точек не пересекается со спектральным откликом Si (рис. 2), тогда фототок от квантовых точек и барьерных областей Si можно разделить. Положим, что спектральная зависимость коэффициента поглощения за счет квантовых точек $\alpha_D(\xi)$ описывается выражением

$$\alpha_D(\xi) = 2 \cdot n_D \cdot \sigma_{ph} \cdot \exp\left(-(\xi - E_{gD})^2 / 2 \cdot \omega\right), \quad (2)$$

где $n_D = N_S/d_L$ — объемная плотность квантовых точек;

σ_{ph} — эффективное сечение поглощения фотонов квантовой точкой;

ω — уширение пика фотопоглощения.

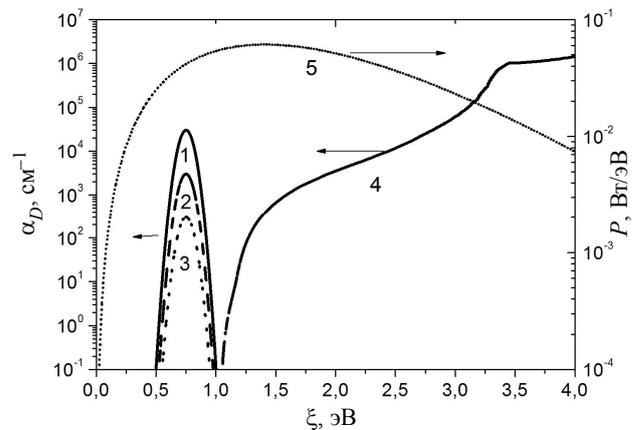


Рис. 2. Процесс поглощения фотонов в i -области:

1—3 — эффективное сечение поглощения фотонов квантовой точкой Si/Ge (σ_{ph}, cm^2): 1 — 10^{-14} , 2 — 10^{-15} , 3 — 10^{-16} ; 4 — коэффициент фотопоглощения кремния; 5 — спектральная зависимость плотности мощности солнечного излучения в условиях AM0

В выражении (2) учтено, что огибающая пика фотопоглощения имеет форму нормального распределения с уширением 50—70 мэВ (см. рис. 2) [6]. Тогда скорость генерации фотоносителей за счет квантовых точек можно записать в виде [7]

$$G_D(\xi, z) = F(\xi)\alpha_D(\xi)\exp[-\alpha_D(\xi)(z - Z_p)]. \quad (3)$$

Фототок, собираемый в i -области за счет квантовых точек, равен

$$j_D(\xi) = e \int_{Z_p}^{Z_p+Z_i} G_D(\xi, z) dz, \quad (4)$$

где Z_i — толщина i -области.

Фототок, генерируемый барьерными областями Si в i -слое, равен

$$j_B(\xi) = e \int_{Z_p}^{Z_p+Z_i} G_B(\xi, z) dz. \quad (5)$$

При записи скорости генерации фотоносителей в барьерных областях Si необходимо учесть, что

часть объема i -слоя занята квантовыми точками Ge, поэтому [7] имеем

$$G_B(\xi, z) = F(\xi) \exp[-\alpha(\xi)Z_p] (1 - n_D V_D) \alpha(\xi) \times \exp(-[1 - n_D V_D] \alpha(\xi)(z - Z_p)), \quad (6)$$

где V_D — объем квантовой точки.

Ток, собираемый из i -слоя, равен

$$j_i(\xi) = j_D(\xi) + j_B(\xi), \quad (7)$$

а полный фототок:

$$J_i = e \int_0^\infty j_i(\xi) d\xi. \quad (8)$$

Ток короткого замыкания солнечного элемента [7] будет

$$J_{SC} = f_i(J_n^p + J_p^n + J_i), \quad (9)$$

где f_i — коэффициент сбора носителей заряда в i -области $p^+ - i - n^+$ -структуры.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) солнечного элемента имеет вид

$$J(V) = J_{SC} - J_0 [\exp(eV / \upsilon kT) - 1], \quad (10)$$

где $J_0 = j_{S1} + j_{S2}$ — обратный ток насыщения $p^+ - i - n^+$ -структуры;

υ — фактор идеальности ВАХ.

Обратный ток формируется неосновными носителями на краях обедненных слоев (j_{S1}) и внутри i -области вследствие термической генерации (j_{S2}). Эти токи определяются шириной запрещенной зоны Si (E_{gSi}) и эффективной шириной запрещенной зоны i -области [7]:

$$E_{eff} = [1 - n_D V_D] E_{gSi} + n_D V_D E_{gD}.$$

Обратный ток j_{S2} в собственной области записывается следующим образом [7]:

$$j_{S2} = A^{eff} \exp\left(-\frac{E_{eff}}{\upsilon kT}\right),$$

где $A^{eff} = e4\pi\delta^2 E_{eff}^2 / c^2 h^3$;

δ — эффективный показатель преломления i -области:

$$\delta = [1 - n_D V_D] \delta_{Si} + n_D V_D \delta_{Ge},$$

где δ_{Si} , δ_{Ge} — показатель преломления кремния и германия, соответственно.

Обратный ток неосновных носителей записывается обычным образом [8]:

$$j_{S1} = A \exp\left(-\frac{E_{gSi}}{\upsilon kT}\right),$$

где

$$A = eN_C N_V \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right).$$

Здесь N_C и N_V — эффективные плотности состояний в Si, N_D и N_A концентрации доноров и акцепторов в n^+ - и p^+ -областях, соответственно.

Максимальная эффективность преобразования солнечного элемента определяется выражением [7]

$$\eta = \frac{V_{max} J_{max}}{P_0} = \frac{V_{max} \left[J_{SC} - J_0 \left(\exp\left(\frac{eV_{max}}{\upsilon kT}\right) - 1 \right) \right]}{P_0},$$

где V_{max} , J_{max} — рабочие напряжение и ток в режиме максимальной отдаваемой электрической мощности солнечным элементом, соответственно;

P_0 — мощность солнечного излучения, равная

$$P_0 = \frac{\sin^2 \theta_S}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{2\pi}{h^3 c^2} \cdot \int_0^\infty \frac{\xi^3 d\xi}{e^{\xi/k_B T} - 1};$$

V_{max} определяется из решения трансцендентного уравнения

$$V_{max} = V_{bs} - \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{kT}{e} V_{max}\right),$$

где V_{bs} — напряжение холостого хода солнечного элемента, равно:

$$V_{bs} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{J_{SC}}{J_0}\right).$$

Величина приращения эффективности преобразования $\Delta\eta$ за счет квантовых точек определялась выражением

$$\Delta\eta = \eta_D - \eta_{WD},$$

где η_D и η_{WD} — эффективность преобразования ФП с и без квантовых точек в собственной области материала, соответственно.

Исследование влияния квантовых точек на эффективность преобразования солнечной энергии ФП проводилось для идеализированного солнечного элемента. При расчетах считалось, что ВАХ солнечного элемента идеальна (фактор идеальности $\upsilon = 1$), собственная область свободна от ловушек, а встроенное электрическое поле такой величины, что генерируемые фотоносители дрейфуют к границе i -слоя за время, меньшее, чем время жизни излучательной рекомбинации, т. е. считаем, что коэффициент сбора носителей заряда $f_i = 1$.

Оценка степени влияния квантовых точек на эффективность преобразования солнечной энергии ФП проводилась путем расчета приращения эффективности преобразования $\Delta\eta$ в зависимости от параметров $p^+ - i - n^+$ -структуры для трех значений эффективного сечения поглощения фотонов квантовой точкой $\sigma_{ph} = 10^{-16}$, 10^{-15} , 10^{-14} см². Диапазон значений σ_{ph} выбирался на основе анализа экспериментальных данных [10, 11].

При проведении расчетов учитывалась зависимость времени жизни носителей заряда в Si, а значит, и диффузионной длины от уровня легирования полупроводникового материала [12]. Считалось, что базовые области легированы однородно. Уровень легирования базовых областей и их геометрические размеры выбирались согласно параметрам экспериментальных структур, представленных в работах [6, 13, 14].

Параметры квантовых точек выбирались в соответствии с работой [6]: размер квантовых точек $L_D = 15$ нм в основании и 1 нм — в высоту; плотность квантовых точек $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; толщина слоя с квантовыми точками $d_L = 10$ нм; объем квантовой точки $V_D = 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3$.

При таких размерах квантовой точки Ge энергетическое положение основного состояния локализованных дырок находится на ~ 360 мэВ выше потолка валентной зоны кремния, а величина энергетического промежутка E_{gD} составляет 750 мэВ [6]. Остальные значения параметров модели, использованных в расчете, приведены в таблице.

Параметры	Значение	Параметры	Значение	Параметры	Значение
$N_A (N_D), \text{ см}^{-3}$	10^{18}	$L_n, \text{ см}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$E_{gD}, \text{ мэВ}$	750/820
$Z_p (Z_n), \text{ мкм}$	0,1	$L_p, \text{ см}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$\omega, \text{ мэВ}$	50
$D_n, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	4	$S_n, \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^3$	$\nu; f_i$	1
$D_p, \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	2,43	$S_p, \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^3$	R	0

Результаты расчета и их обсуждение

Приведенные на рис. 3, а результаты показывают, что с увеличением толщины i -области наблюдается монотонное увеличение величины $\Delta\eta$ для всех трех значений эффективного сечения поглощения фотонов σ_{ph} . Из рис. 3 следует, что для всех значений σ_{ph} наблюдается насыщение зависимостей $\Delta\eta(Z_i)$. Для практически реализуемых методом МЛЭ толщин выращивания (~ 10 мкм) величина приращения $\Delta\eta$ составляет 4,91, 1,44 и 0,13 % для значений эффективного сечения поглощения фотонов $\sigma_{ph} 10^{-14}, 10^{-15}, 10^{-16} \text{ см}^2$, соответственно.

Увеличить значение приращения $\Delta\eta$ можно путем увеличения степени концентрации солнечного излучения. Так, при толщине собственной области $Z_i = 10$ мкм и значении эффективного сечения поглощения фотонов $\sigma_{ph} = 10^{-14} \text{ см}^2$ величина $\Delta\eta$ увеличивается до 5,85 % при степени концентрации солнечного излучения $X=100$, а при $X=1000$ возрастает до 6,31 %.

Анализ проведенных расчетов показал, что величина $\Delta\eta$ линейным образом зависит от $\log(X)$:

$$\Delta\eta(X) \sim \gamma \cdot \log(X),$$

где коэффициент пропорциональности γ равен 0,467; 0,137 и 0,016 для значений σ_{ph} , равных $10^{-14}, 10^{-15}, 10^{-16} \text{ см}^2$, соответственно.

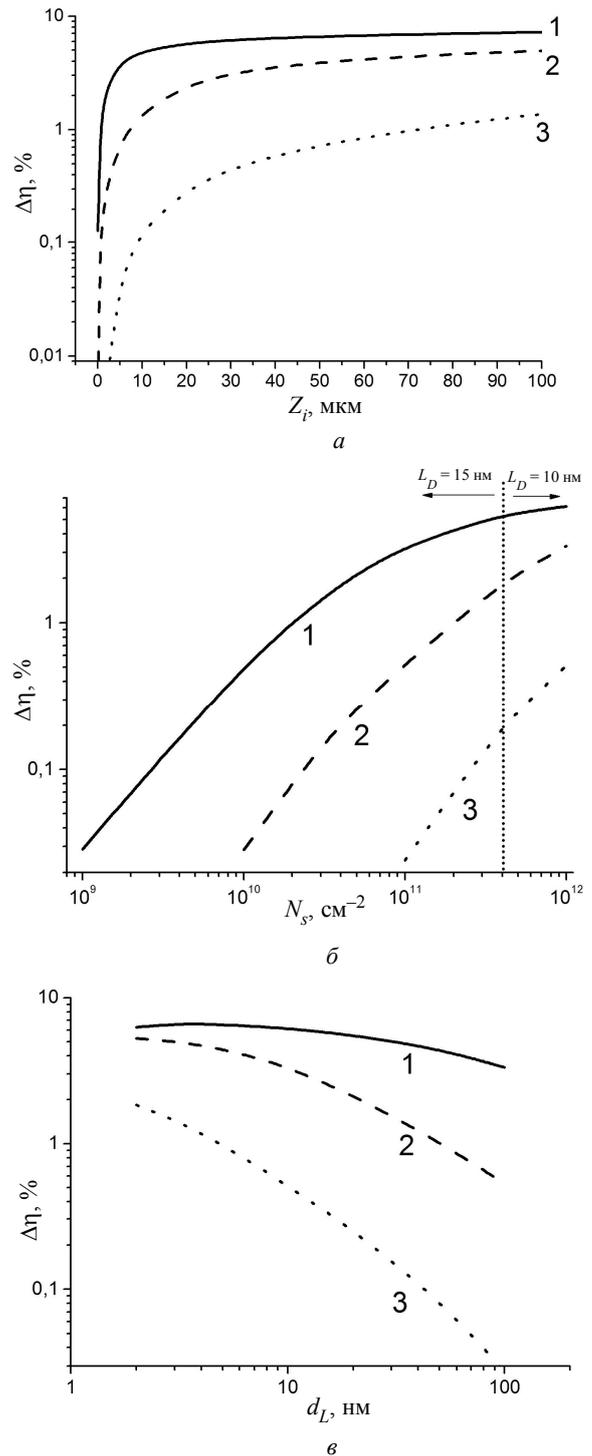


Рис. 3. Зависимость величины приращения эффективности преобразования $\Delta\eta$ от:

а — толщин Z_i i -области p^+i-n^+ -структуры ($L_D = 15$ нм, $N_S = 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, $d_L = 10$ нм); б — поверхностной плотности квантовых точек N_S в i -области ($d_L = 10$ нм); в — толщин слоя с квантовыми точками d_L ($L_D = 10$ нм, $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$). Эффективное сечение поглощения фотонов квантовой точкой ($\sigma_{ph}, \text{ см}^2$): 1 — 10^{-14} , 2 — 10^{-15} ; 3 — 10^{-16}

Из выражений (2)—(9) видно, что на величину тока короткого замыкания, а значит, и на эффек-

тивность преобразования солнечного элемента большое влияние оказывает коэффициент поглощения α_D , характеризующий скорость генерации фотоносителей за счет оптических переходов из основного состояния дырок в квантовой точке Ge в зону проводимости Si. На величину коэффициента поглощения α_D существенным образом влияет объемная плотность квантовых точек n_D , которая в свою очередь определяется поверхностной плотностью квантовых точек N_S и толщиной слоя с квантовыми точками d_L (см. рис. 1).

На рис. 3, б представлены зависимости величины приращения $\Delta\eta$ от поверхностной плотности квантовых точек N_S . Расчет показывает, что с увеличением значения N_S величина приращения $\Delta\eta$ возрастает, однако увеличение поверхностной плотности квантовых точек ограничивается предельным значением, которое определяется основанием квантовой точки L_D . Так, при $\sigma_{ph} = 10^{-14} \text{ см}^2$ и значении $L_D = 15 \text{ нм}$ предельное значение поверхностной плотности квантовых точек N_S составляет $\sim 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, а соответствующее ей приращение $\Delta\eta$ — 5,2 %.

Для увеличения поверхностной плотности квантовых точек и увеличения величины $\Delta\eta$ необходимо уменьшить линейный размер основания квантовой точки. Так, при значении $L_D = 10 \text{ нм}$ предельное значение поверхностной плотности N_S возрастает до 10^{12} см^{-2} , а величина приращения $\Delta\eta$ — до 6,15 % для значения эффективного сечения поглощения фотонов $\sigma_{ph} = 10^{-14} \text{ см}^2$.

Необходимо отметить, что с изменением величины L_D изменяется значение эффективной ширины запрещенной зоны E_{gD} и сдвигается максимум пика фотопоглощения за счет квантовых точек [6]. Так, при уменьшении величины L_D с 15 до 10 нм значение E_{gD} возрастет до 820 мэВ, а максимум пика фотопоглощения за счет квантовых точек (см. рис. 2) сдвинется на 70 мэВ в сторону фундаментального поглощения кремния.

Зависимости величины приращения $\Delta\eta$ от толщины слоя с квантовыми точками d_L представлены на рис. 3, в, из которого видно, что с уменьшением d_L величина приращения $\Delta\eta$ возрастает. Так, при $\sigma_{ph} = 10^{-14} \text{ см}^2$ и поверхностной плотности квантовых точек $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ величина приращения $\Delta\eta$ достигает максимального значения 6,6 % при уменьшении толщины слоя с квантовыми точками d_L до 4 мкм.

Наблюдаемое поведение зависимости $\Delta\eta(d_L)$ объясняется тем, что с уменьшением толщины d_L увеличивается объем, занимаемый квантовыми точками, и возрастает величина $n_D V_D$, а значит, будет возрастать величина фототока, обусловленного генерацией фотоносителей за счет квантовых точек [(5)—(10)].

Анализ расчетных значений тока короткого замыкания J_{SC} , напряжения холостого хода V_{bs} , рабочего тока J_{max} и напряжения V_{max} ФП показал, что наличие квантовых точек приводит к увеличению значений тока короткого замыкания J_{SC} и рабочего тока J_{max} за счет дополнительного фототока, возникающего вследствие наличия дополнительной фотогенерации носителей в i -области солнечного элемента. В то же время следует, что в области значений величины приращения менее $\Delta\eta_{lim}$ наблюдается уменьшение напряжения холостого хода V_{bs} и рабочего напряжения V_{max} для ФП с квантовыми точками по сравнению с ФП без них.

Величина $\Delta\eta_{lim}$ определяется значением эффективного сечения поглощения σ_{ph} . Закон изменения $\Delta\eta_{lim}(\sigma_{ph})$ в первом приближении можно описать выражением

$$\Delta\eta_{lim}(\sigma_{ph}) = -7,28 - 0,55 \cdot \log(\sigma_{ph}).$$

При значении $\sigma_{ph} = 10^{-16} \text{ см}^2$, для которого величина $\Delta\eta_{lim}$ составляет 1,5 %, и значении приращения эффективности преобразования 0,5 % величина напряжения холостого хода V_{bs} на 0,17 % меньше соответствующей величины для ФП без квантовых точек, а значения рабочего напряжения V_{max} меньше на 0,18 %. В диапазоне значений $\Delta\eta$ более $\Delta\eta_{lim}$ значения напряжения холостого хода V_{bs} и рабочее напряжение V_{max} для ФП с квантовыми точками превышают соответствующие значения для солнечного элемента без квантовых точек.

Заключение

В работе дана оценка степени влияния квантовых точек на эффективность преобразования солнечной энергии фотопреобразователем на основе идеального кремниевого p^+i-n^+ -диода. Результаты расчета показывают, что для практически реализуемых методом молекулярно-лучевой эпитаксии толщин выращивания введение квантовых точек позволяет повысить эффективность преобразования солнечной энергии на 6,6 %. Увеличить значение приращения эффективности преобразования можно за счет увеличения концентрации солнечного излучения X , причем закон изменения приращения $\Delta\eta$ от $\log(X)$ является линейным. Величина приращения эффективности преобразования $\Delta\eta$ определяется поверхностной плотностью квантовых точек N_S и толщиной слоя с квантовыми точками d_L . Выбор оптимальных значений поверхностной плотности квантовых точек и толщины слоя с квантовыми точками позволяет повысить значение эффективности преобразования $\Delta\eta$.

Анализ расчетных значений тока короткого замыкания J_{SC} , напряжения холостого хода V_{bs} , рабочих тока J_{max} и напряжения V_{max} фотопреобразователя показал, что в области значений величины приращения $\Delta\eta$ менее $\Delta\eta_{lim}$ наблюдается уменьшение напряжения холостого хода V_{bs} и рабочего напряжения V_{max} для фотопреобразователя с квантовыми точками по сравнению с фотопреобразователем без них. В диапазоне значений $\Delta\eta$ более $\Delta\eta_{lim}$ значения напряжения холостого хода V_{bs} и рабочее напряжение V_{max} для фотопреобразователя с квантовыми точками превышают соответствующие значения для солнечного элемента без квантовых точек. Величина $\Delta\eta_{lim}$ определяется значением эффективного сечения поглощения σ_{ph} .

Работа поддержана ФЦП "Научные
и научно-педагогические кадры инновационной
России" ГК № П-234 и ГК № П-1662,
АВЦП рег. № 2.1.2/6551.

Л и т е р а т у р а

1. Алферов Ж. И., Андреев В. М.//ФТП. 2004. Т. 38. В. 8. С. 937.
2. Lique A., Marti A.//Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78. No. 26. P. 5014.
3. Marti A., Lopez N., Lique A. et al.//Thin Solid Films. 2006. V. 511, 512. P. 638.
4. Рынок электроники. Итоги и тенденции//ChipNews. 2007. No. 6. P. 4—15.
5. Пчеляков О. П., Болховитянов Ю. Б., Двуреченский А. В., Соколов Л. В., Никифоров А. И., Якимов А. И., Фойхтлендер Б.//ФТП. 2000. Т. 34. В. 11. С. 1281.
6. Yakimov A. I., Stepina N. P., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I.//Phys. Rev. B. 2001. V. 63. P. 045312.
7. Aroutiounian V., Petrosyan S., Khachatryan A., Touryan K. // Journal of Applied Physics. 2001. V. 89. No. 4. P. 2268—2271.
8. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов. — Томск: Изд-во науч.-техн. лит-ры, 2000.
9. Marti A., Cuadra L., Luque A.//Physica E. 2002. V. 14. P. 150.
10. Boucaud P., Le Thanh V. et al.//Appl. Phys. Lett. V. 74. No. 3. P. 401—403.
11. Двуреченский А. В., Якимов А. И.//ФТП. 2001. Т. 35. В. 9. С. 1143.
12. База данных: Новые полупроводниковые материалы: диагностика и свойства//режим доступа: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>.
13. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Proskuryakov Yu. Yu.//J. Appl. Phys. 2001. V. 89. No. 10. P. 5676—5681.
14. Alguno A., Usami N., Ujihara T. et al.//Ibid. 2004. V. 84. No. 15. P. 2802—2804.

Efficiency of solar energy conversion by Si solar cell with Ge quantum dots

A. V. Voitsekhovskii, D. V. Grigor'ev

Siberian Physical-Technical Institute, 1 Novosobornaya str., Tomsk, 634050, Russia

E-mail: vav@elefot.tsu.ru

O. P. Pcheljakov, A. I. Nikiforov

Institute of Semiconductors Physics, 13 Lavrent'ev av., Novosibirsk, 603090, Russia

The model of the solar cell on basis p^+-i-n^+ Si-structure witch include the layers with Ge quantum dots in i-area is considered. For definition of the solar cell conversion efficiency the calculation of the p^+-i-n^+ structure photocurrent was carried out. As a result of calculation the estimation of a quantum dot effect on efficiency of photoconverter are received.

PACS: 84.60.Jt; 85.35.Be; 85.60.Bt

Keywords: sun element, quantum point, photocurrent, efficiency.

Bibliography — 14 references.

Received 11 December 2008