

# Разработка конструкции многопереходных солнечных элементов на основе гетероструктур GaPNAs/Si методом компьютерного моделирования

© Д.А. Кудряшов\*<sup>¶</sup>, А.С. Гудовских\*<sup>†</sup>, Е.В. Никитина\*, А.Ю. Егоров\*

\* Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>†</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 197376 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 июля 2013 г. Принята к печати 19 августа 2013 г.)

Проведен расчет конструкции двух и трех переходных солнечных элементов на основе GaPNAs/Si решеточно-согласованных гетероструктур. Показано, что двухпереходные солнечные элементы, состоящие из перехода на основе твердого раствора GaPNAs с шириной запрещенной зоны 1.78 эВ и перехода на основе Si, могут достигать КПД 30.3% при AM1.5D 100 мВт/см<sup>2</sup> и 35.4 % при AM1.5D 20 Вт/см<sup>2</sup>. Максимальные значения КПД трехпереходного солнечного элемента, состоящего из верхнего и среднего перехода на основе GaPNAs с  $E_g$  2 и 1.5 эВ соответственно и нижнего перехода на основе Si, составляют 39.2% при AM1.5D 100 мВт/см<sup>2</sup> и 44.5% при AM1.5D 50 Вт/см<sup>2</sup>. Показано влияние толщины и времени жизни неосновных носителей заряда фотоактивных слоев на эффективность преобразования солнечной энергии разрабатываемых гетероструктур.

## 1. Введение

Солнечная энергия является неиссякаемым источником энергии на Земле, что обуславливает перспективы более интенсивного применения фотоэлектрического преобразования солнечной энергии. Однако развитие солнечной энергетики требует постоянного совершенства солнечных элементов (СЭ).

Наибольшей эффективностью преобразования обладают многопереходные гетероструктурные фотопреобразователи на основе соединений A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> [1], которые находят свое применение в наземных (концентраторных) и космических солнечных батареях. На сегодняшний день основу массового выпуска многопереходных СЭ составляют согласованные по параметру решетки трехпереходные СЭ GaInP/GaAs/Ge, КПД которых превышает 40% для концентрированного солнечного излучения [2]. Эти значения КПД очень близки к теоретическому пределу для GaAs-согласованных систем. Данный факт обуславливает интенсивный поиск новых решений для дальнейшего повышения эффективности, который ведется учеными во всем мире. В последние годы были предложены различные подходы к решению проблемы повышения эффективности СЭ, такие как повышение числа каскадов до четырех и пяти, используя сложные четверные соединения A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> (в частности, GaInNAs); создание однопереходных СЭ с использованием эффекта межзонного поглощения (расщепление зон), а также с использованием квантовых точек и ям [3]. Однако отсутствие на данный момент значимых результатов по каждому из вышеперечисленных направлений не позволяет однозначно судить об их потенциальной возможности

превзойти достигнутые значения эффективности „классических“ трехкаскадных структур. Таким образом, для дальнейшего повышения эффективности преобразования солнечного излучения необходим поиск новых решений. Одним из способов решения этой задачи может быть создание многопереходных СЭ, но на основе других систем, в частности Ga–P–N–As, согласованных по параметру решетки с Si.

Интерес к использованию соединения GaP<sub>1-x-y</sub>N<sub>x</sub>As<sub>y</sub> обусловлен тем, что этот твердый раствор может оставаться согласованным по параметру решетки с кремниевой подложкой при большом диапазоне значений ширины запрещенной зоны 1.5–2.0 эВ [4]. Также твердые растворы Ga–P–N–As представляют большой интерес с точки зрения создания новых оптоэлектронных приборов, поскольку при добавлении азота (начиная с очень малого содержания 0.43%) полупроводниковое соединение GaP<sub>1-x-y</sub>N<sub>x</sub>As<sub>y</sub> становится прямозонным полупроводником, при этом незначительное содержание азота (единицы процента) приводит к существенному уменьшению ширины запрещенной зоны ( $E_g$ ) полупроводникового соединения [5]. Данный факт дает теоретические предпосылки к созданию эффективных СЭ на основе соединений GaPNAs на кремниевых подложках. Теоретические оценки показали, что согласованные по параметру решетки с кремнием трехпереходные СЭ, в которых верхний переход выполнен на основе GaPNAs с шириной зоны 2 эВ (содержание азота порядка 1.5%), средний — на основе GaPNAs с  $E_g \approx 1.5$  эВ (содержание азота порядка 4%), в комбинации с СЭ на Si ( $E_g = 1.12$  эВ), обладают более высоким пределом КПД по сравнению с „классическими“ трехпереходными СЭ GaInP/GaAs/Ge (47% и 44.2% соответственно) [6].

<sup>¶</sup> E-mail: kudryashovda@spbau.ru

В данной работе представлены результаты исследований по определению максимально достижимых значений КПД многопереходных СЭ на основе гетероструктур GaPNAs/Si, проведенных с помощью компьютерного моделирования, используя приближенные параметры материалов. Проведен анализ влияния параметров слоев и свойств материалов на эффективность преобразования солнечной энергии.

## 2. Детали моделирования

Компьютерное моделирование проводилось с помощью программного продукта SILVACO-ATLAS. Расчет проводился для квазиодномерной модели методом Ньютона с использованием статистики Ферми–Дирака. Для расчета туннельных диодов применялась модель межзонного туннелирования. В разработанной модели верхний и нижний контакты рассматривались как омические. В модель также был введен верхний слой *n*-GaAs для учета влияния контактного слоя, находящегося под металлической сеткой, на транспорт носителей заряда. Коэффициент поглощения в этом слое был равен нулю. Для определения максимально достижимых значений эффективности преобразования солнечной энергии коэффициент отражения от лицевой поверхности СЭ также задавался равным нулю.

Сложность теоретического расчета приборов на основе твердых растворов GaPNAs заключается в том, что это новый материал со сложной зонной структурой и в литературе мало достоверных данных для параметров слоев GaPNAs. Внедрение азота в GaP(As) даже на уровне единиц процентов приводит к расщеплению зоны проводимости на две подзоны:  $E^-$  и  $E^+$  [7]. В литературе приводятся достаточно противоречивые данные по значению эффективных масс электронов для нижней зоны проводимости  $E^-$ , что вызывает неопределенность в оценке величины эффективной плотности состояний зоны проводимости ( $N_C$ ). При расчете рассматривались два предельных значения  $N_C$   $5 \cdot 10^{17}$  и  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , соответствующие GaAs и GaP. Схожая ситуация складывается с величинами разрывов зон на гетерограницах GaP/GaPNAs. В связи с этим большую ценность представляет работа [8], где был экспериментально определен разрыв зон проводимости 0.28 эВ для границы раздела  $\text{GaN}_{0.02}\text{As}_{0.12}\text{P}_{0.84}$  (2.0 эВ)/GaP. Опираясь на этот экспериментальный результат, значения разрывов зон для других составов оценивались по правилу Вегарда.

Состав фотоактивных слоев GaPNAs менялся исходя из условий согласования по параметру решетки к подложке Si. Спектры коэффициента поглощения для соединений GaPNAs различного состава (с  $E_g$  от 1.5 до 2 эВ) были взяты из [4]. Согласно экспериментальным данным, представленным в работе [7], значения подвижности электронов и дырок в GaPN при концентрации азота порядка 1% и уровне легирования  $5 \cdot 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при 300 К достигают значения 20

Таблица 1. Параметры слоев двухпереходного СЭ GaPNAs/Si

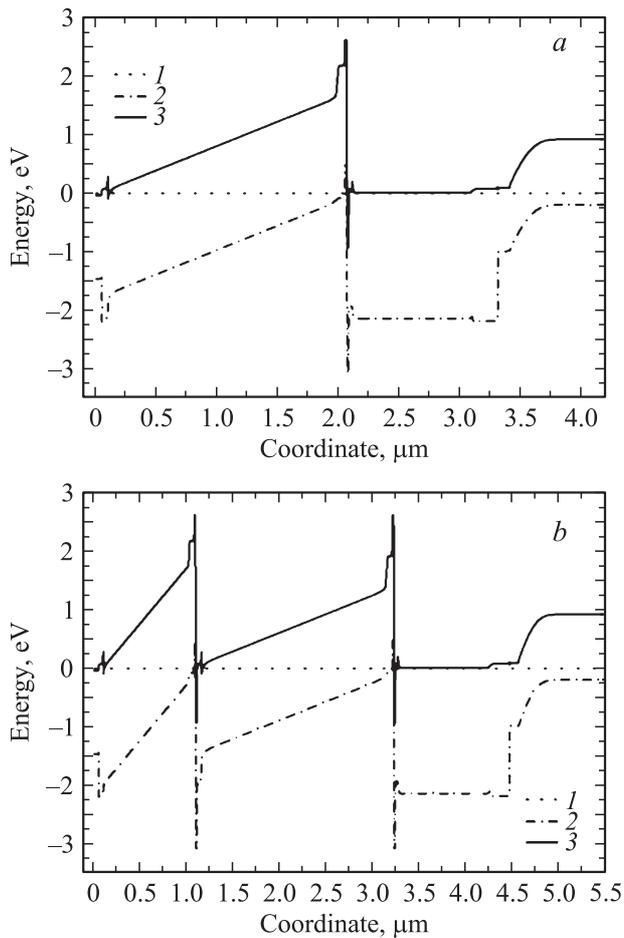
Материал	$E_g$ , эВ	Толщина, мкм	Уровень легирования, $\text{см}^{-3}$
<i>n</i> -GaAs	1.42	0.05	$10^{18}$
<i>n</i> -GaP	2.26	0.05	$10^{18}$
<i>i</i> -GaP <sub>0.893</sub> N <sub>0.037</sub> As <sub>0.07</sub>	1.78	1–2.6	$10^{12}$
<i>p</i> -GaP	2.26	0.05	$10^{18}$
<i>p</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.017	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.014	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> -GaPN	2	0.03	$10^{18}$
<i>n</i> -GaP	2.26	0.2	$10^{18}$
<i>n</i> <sup>+</sup> -Si	1.12	0.1	$10^{18}$
<i>p</i> -Si (подложка)	1.12	380	$10^{16}$
<i>p</i> <sup>+</sup> -Si	1.12	1	$10^{18}$

Таблица 2. Параметры слоев трехпереходного СЭ GaPNAs/Si

Материал	$E_g$ , эВ	Толщина, мкм	Уровень легирования, $\text{см}^{-3}$
<i>n</i> -GaAs	1.42	0.05	$10^{18}$
<i>n</i> -GaP	2.26	0.05	$10^{18}$
<i>i</i> -GaP <sub>0.98</sub> N <sub>0.02</sub>	2.0	0.5–1.5	$1 \cdot 10^{12} / 5 \cdot 10^{17}$
<i>p</i> -GaP	2.26	0.05	$10^{18}$
<i>p</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.017	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.014	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> -GaPN	2	0.05	$10^{18}$
<i>i</i> -GaP <sub>0.735</sub> N <sub>0.065</sub> As <sub>0.20</sub>	1.5	0.5–3.5	$1 \cdot 10^{12} / 5 \cdot 10^{17}$
<i>p</i> -GaPN	2	0.05	$1 \cdot 10^{18}$
<i>p</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.017	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> <sup>++</sup> -GaPAs	2.15	0.014	$3 \cdot 10^{20}$
<i>n</i> -GaPN	2	0.03	$10^{18}$
<i>n</i> -GaP	2.26	0.2	$10^{18}$
<i>n</i> <sup>+</sup> -Si	1.12	0.1	$10^{18}$
<i>p</i> -Si (подложка)	1.12	380	$10^{16}$
<i>p</i> <sup>+</sup> -Si	1.12	1	$10^{18}$

и  $50 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  соответственно. В расчете подвижность электронов и дырок для слабо легированных слоев принимались равными  $50 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . При оценке максимально достижимых значений эффективности преобразования предполагалось, что время жизни неосновных носителей заряда в слоях GaPNAs ограничено излучательной рекомбинацией. Соответственно время жизни неосновных носителей заряда ( $\tau$ ) для этих слоев задавали на уровне экспериментальных значений времен жизни излучательной рекомбинации, измеренных для разбавленных нитридов 10–100 нс [9]. По умолчанию эта величина была равна 10 нс.

Конструкция двухпереходного солнечного элемента состоит из нижнего *p*–*n*-перехода на основе кремния и верхней *p*–*i*–*n*-структуры, состоящей из высоколегированных *p*- и *n*-слоев GaPN и нелегированного слоя GaPNAs с шириной запрещенной зоны 1.78 эВ. Параметры слоев представлены в табл. 1. Расчетная зона



**Рис. 1.** Расчетные зонные диаграммы в состоянии равновесия для двухпереходного (а) и трехпереходного (b) СЭ. Уровень Ферми — 1, валентная зона — 2, зона проводимости — 3.

диаграмма показана на рис. 1, а. Видно, что *p*- и *n*-слои GaPN также выполняют функцию широкозонного окна и тыльного потенциального барьера соответственно. Они создают потенциальный барьер, ограничивающий поток неосновных носителей заряда, снижая тем самым уровень поверхностной рекомбинации. С другой стороны, слои обеспечивают беспрепятственный транспорт для основных носителей заряда. Аналогичным образом выглядит ситуация для слоя *n*-GaP, граничащего со слоем *n*-Si. В расчете проводилась вариация толщины, а также значения времени жизни носителей заряда для *i*-слоя GaPNAs и *p*-Si.

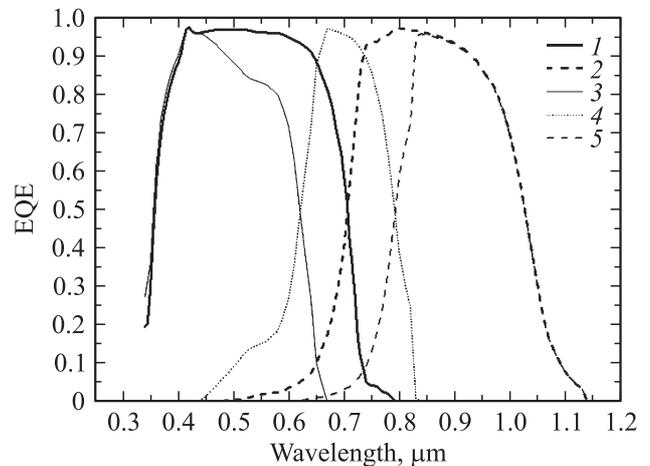
При расчете трехпереходного СЭ рассматривались два варианта конструкции с верхним и средним переходами на основе *p-i-n*-структур и на основе *p-n*-переходов. Ширина запрещенной зоны активных слоев GaPNAs для верхнего перехода составляла 2.0 эВ, а для среднего перехода 1.5 эВ. Параметры слоев трехпереходных структур представлены в табл. 2, а пример расчетной зонной диаграммы для случая с *p-i-n*-структурами изображен на рис. 1, b. Аналогично в ситуации с двухпереходным СЭ барьерные слои GaP и GaPN

формируют барьер для основных носителей заряда и не препятствуют транспорту основных носителей заряда.

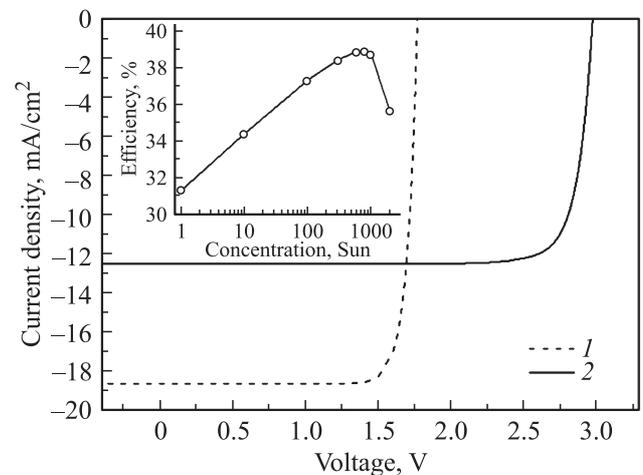
### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Моделирование характеристик двухпереходного солнечного элемента GaPNAs/Si

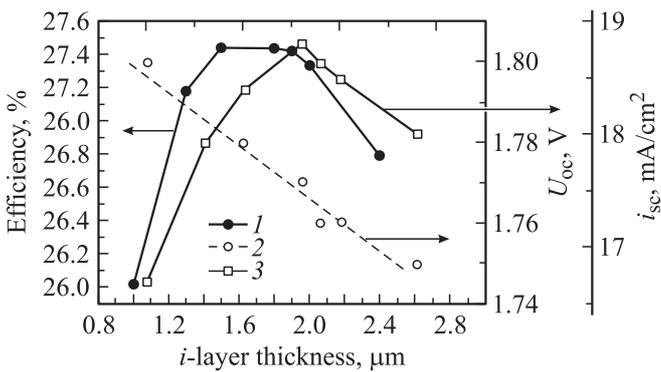
При оптимизации конструкции многопереходных СЭ необходимо обеспечить условия согласования по току, т.е. обеспечить равное значение тока короткого замыкания, генерируемого каждым из переходов под воздействием солнечного излучения. На рис. 2 представ-



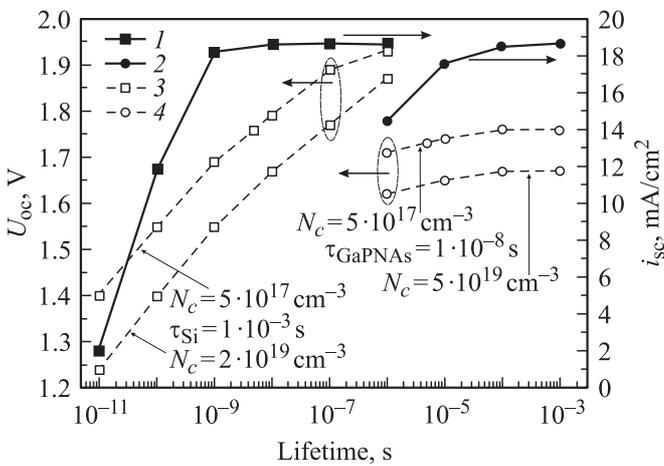
**Рис. 2.** Расчетные спектры внешней квантовой эффективности для двух- и трехпереходного СЭ. Для двухпереходного СЭ спектр верхнего перехода — 1, нижнего перехода — 2. Для трехпереходного СЭ спектр верхнего перехода — 3, среднего перехода — 4, нижнего перехода — 5.



**Рис. 3.** Расчетные ВАХ двухпереходного — 1 и трехпереходного — 2 СЭ при освещении AM1.5D 100 мВт/см<sup>2</sup>. На вставке — зависимость КПД трехпереходного СЭ от концентрации солнечного излучения (AM1.5D).



**Рис. 4.** Влияние толщины  $i$ -слоя GaPNAs на величину эффективности — 1, напряжение холостого хода — 2 и ток короткого замыкания — 3 двухпереходного СЭ.



**Рис. 5.** Зависимость  $J_{SC}$  (1, 2) и  $V_{OC}$  (3, 4) от времени жизни носителей заряда в  $i$ -слое GaPNAs (для двух значений  $N_c$ ) — слева и в  $p$ -Si — справа.

лены расчетные спектры внешней квантовой эффективности двухпереходного СЭ, согласованного по току для условий освещения AM1.5D. Спектр фоточувствительности верхнего GaPNAs перехода находится в диапазоне 350–750 нм, а нижнего в диапазоне 650–1150 нм. Расчетная вольт-амперная характеристика (ВАХ) для этого случая показана на рис. 3. ВАХ имеет нормальный для СЭ вид, что свидетельствует об отсутствии ограничения транспорта носителей барьерными слоями и туннельным переходом. Напряжение холостого хода ( $V_{OC}$ ) достигает значения 1.76 В, ток короткого замыкания ( $J_{SC}$ ) равен 18.6 мА/см<sup>2</sup>, коэффициент заполнения (*fill factor*,  $FF$ ) — 83.2%, а кпд — 27.4%.

Согласование по току в двухпереходных СЭ достигается за счет вариации толщины верхнего перехода. Однако, как показано на рис. 4, толщина нелегированной области GaPNAs  $p$ - $i$ - $n$ -перехода имеет более сложное влияние на эффективность преобразования (кпд). Видно, что зависимость кпд от толщины имеет максимум при толщинах порядка 1.4–1.8 мкм, в то время как условия

согласования по току, соответствующие максимальному значению  $J_{SC}$  двухпереходного СЭ, достигаются при толщине 1.8 мкм. Такое поведение можно объяснить, проследив влияние толщины  $i$ -области на  $V_{OC}$  и  $J_{SC}$  СЭ. С увеличением толщины слабо легированного слоя происходит, с одной стороны, увеличение области фотогенерации носителей заряда, что приводит к увеличению тока короткого замыкания верхнего каскада GaPNAs, а с другой — рост толщины  $i$ -области приводит к снижению эффективности разделения носителей вследствие уменьшения градиента напряженности электрического поля между  $p$ - и  $n$ -обкладками, что сказывается на уменьшении  $V_{OC}$ .

На эффективность работы СЭ сильно влияет такой важный параметр материала как время жизни неосновных носителей заряда. На рис. 5 показана зависимость  $V_{OC}$  и  $J_{SC}$  двухпереходного СЭ от времени жизни носителей заряда ( $\tau$ ) в  $i$ -слое GaPNAs для фиксированного значения  $\tau = 1$  мс в  $p$ -Si и двух предельных значений  $N_c$  в GaPNAs. Также на рис. 5 представлена аналогичная зависимость от  $\tau$  в  $p$ -Si для фиксированного значения  $\tau = 10$  нс в  $i$ -слое GaPNAs. Из рис. 5 видно, что с ростом времени жизни неосновных носителей заряда в активных слоях происходит увеличение тока короткого замыкания и величины напряжения холостого хода. При  $\tau > 1$  нс в  $i$ -слое GaPNAs и порядка 1 мс в  $p$ -Si подложке наблюдается насыщение величины  $J_{SC}$ . Дальнейшее повышение  $\tau$  в  $i$ -слое GaPNAs приводит к росту  $V_{OC}$ , и, следовательно, кпд. Абсолютная величина  $V_{OC}$  зависит от используемого в расчете значения  $N_c$ , поскольку оно определяет положение уровня Ферми на краях  $i$ -области т.е. величину встроенного потенциала. Следует заметить, что для нижнего перехода при  $\tau > 0.1$  мс в подложке  $p$ -Si величина  $V_{OC}$  не зависит от  $\tau$  и ограничена уже поверхностной рекомбинацией на тыльном контакте.

Снижения уровня поверхностной рекомбинации на тыльном контакте можно достичь, заменив слой тыльного потенциального барьера ( $p^+$ -Si) на слой легированного аморфного гидрогенизированного кремния ( $a$ -Si:H)  $p$ -типа проводимости, аналогично тому как это делается в СЭ на основе гетеропереходов  $a$ -Si:H/ $c$ -Si [10]. В этом случае  $V_{OC}$  возрастает на 0.1 В, что приводит к существенному повышению кпд до 30.28% (табл. 3).

**Таблица 3.** Максимально достижимые параметры ВАХ СЭ при неконцентрированном солнечном излучении AM1.5D (100 мВт/см<sup>2</sup>)

Тип СЭ	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , мА/см <sup>2</sup>	$FF$ , %	кпд, %
2 перехода $p$ - $i$ - $n$	1.87	19.32	83.77	30.28
3 перехода $p$ - $i$ - $n$	3.03	12.69	85.33	32.85
3 перехода $p$ - $n$	3.47	12.58	89.5	39.17

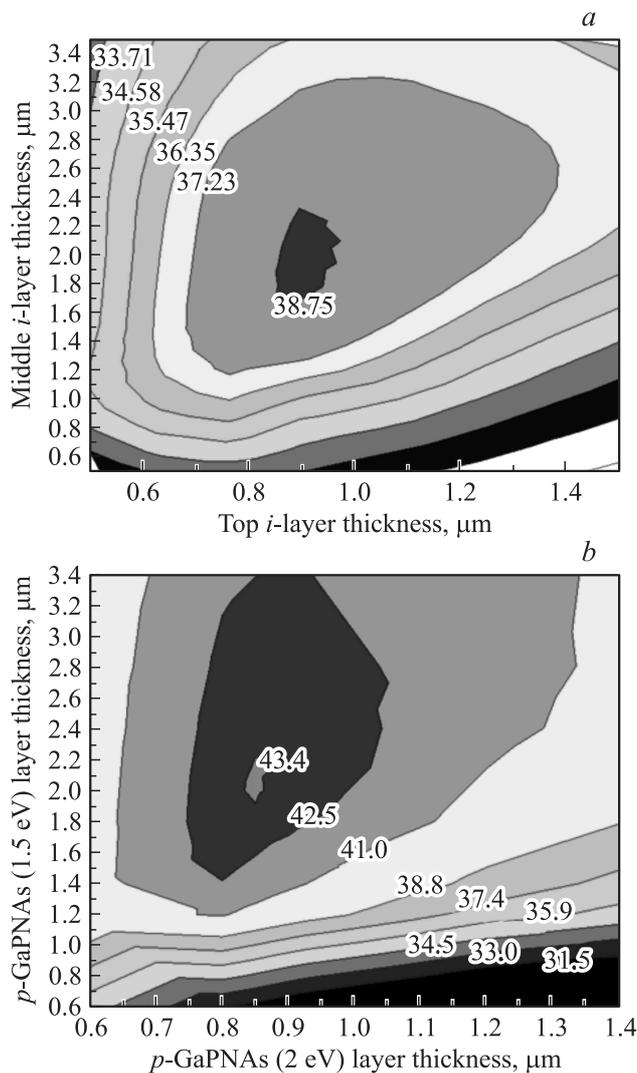


Рис. 6. Расчетные значения КПД трехпереходного СЭ с  $p-i-n$  (a) и  $p-n$  (b) структурами в зависимости от толщины верхнего и среднего фотоактивного слоя при концентрированном солнечном излучении (AM1.5D 100 Вт/см<sup>2</sup>).

### 3.2. Моделирование характеристик трехпереходного GaPNAs/Si солнечного элемента

Расчетные спектры квантовой эффективности для трехпереходного СЭ с двумя верхними переходами на основе  $p-i-n$ -структур представлены на рис. 2. Спектр fotocувствительности верхнего перехода на основе GaPNAs с  $E_g = 2$  эВ лежит в диапазоне 350–6540 нм, а спектр fotocувствительности среднего перехода на основе GaPNAs с  $E_g = 1.5$  эВ — в диапазоне 500–820 нм, коротковолновая граница спектра нижнего Si перехода смещается в область 780 нм. Форма длинноволнового края спектра верхнего перехода и коротковолнового края среднего перехода свидетельствуют о том, что фотоны с длиной волны 0.5–0.6 мкм не полностью поглощаются в активном слое верхнего перехода и ча-

стично поглощаются активным слоем среднего перехода. Однако при выполнении условия согласования по току величина  $J_{SC}$  достигает значения 12.5 мА/см<sup>2</sup>. На рис. 3 представлена расчетная ВАХ трехпереходного СЭ для этого случая. Видно, что  $V_{OC}$  возрастает до величины 2.97 В, а КПД до 31.3%. ВАХ для трехпереходного СЭ также не имеет перегибов и других особенностей, обусловленных ограничением транспорта носителей заряда. Вид ВАХ сохраняется и при высоких концентрациях солнечного излучения. С ростом концентрации солнечного излучения до 500 крат КПД СЭ возрастает до значения, превышающего 38% (см. вставку на рис. 3) за счет увеличения  $V_{OC}$ . При большей концентрации солнечного излучения КПД начинает уменьшаться за счет уменьшения FF, обусловленного влиянием объемного сопротивления подложки  $p-Si$ . Таким образом, как видно из рис. 3, предложенная конструкция трехпереходного СЭ потенциально может эффективно работать при концентрации солнечного излучения в 1000 крат.

Для оптимизации параметров трехпереходного СЭ было произведено параметрическое моделирование с варьированием толщин фотоактивных областей верхнего и среднего переходов (рис. 6, a). Из рис. 6, a можно определить, что максимальное значение КПД СЭ (38.87%) наблюдается в достаточном узком диапазоне толщин — 2 мкм для среднего  $i$ -слоя GaPNAsP и 0.9 мкм для верхнего  $i$ -слоя GaPNAsP.

Дальнейшее повышение КПД возможно в случае достижения высоких значений времени жизни неосновных носителей заряда (10–100 нс) в легированных слоях GaPNAs. Тогда становится рациональным использование  $p-n$ -переходов вместо  $p-i-n$ -структур для верхнего и среднего каскада трехпереходного СЭ. Для структуры, в которой слабо легированные  $i$ -области GaPNAs были заменены на слои  $p-GaPNAs$  ( $5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>), максимально достижимое значение КПД составляет 43.8% при концентрации солнечного излучения 500 крат. Оптимизация толщин активных  $p-GaPNAs$  слоев верхнего и среднего перехода трехпереходного СЭ, представленная на рис. 6, b, показала, что максимальное значение КПД наблюдается в узком диапазоне толщин — 2 мкм для слоя  $p-GaPNAsP$  (1.5 эВ) среднего перехода и 0.85 мкм для слоя  $p-GaPNAsP$  (2 эВ) верхнего перехода.

Аналогично ситуации с двухпереходным СЭ дополнительного повышения КПД трехпереходного СЭ удастся достичь, заменив слой тыльного потенциального барьера

Таблица 4. Максимально достижимые параметры ВАХ СЭ при концентрированном солнечном излучении AM1.5D

Тип СЭ	$V_{OC}$ , В	$J_{SC}$ , А/см <sup>2</sup>	FF, %	КПД, %	Концентрация, крат
2 перехода $p-i-n$	2.22	3.8	82.27	35.36	200
3 перехода $p-i-n$	3.73	6.3	83.67	39.62	500
3 перехода $p-n$	3.95	6.3	89.69	44.55	500

на слой легированного  $a$ -Si:H  $p$ -типа проводимости. В этом случае величина потенциально достижимого КПД, согласно расчетам, составляет 44.55% (табл. 4).

Проведенный теоретический расчет характеристик СЭ позволяет оценить максимально достижимые значения КПД для различных конструкций, которые приведены в табл. 3 для неконцентрированного солнечного излучения (AM1.5D 100 мВт/см<sup>2</sup>) и в табл. 4 для концентрированного солнечного излучения. Во всех случаях расчет был проведен с тыльным потенциальным барьером на основе ( $p$ ) $a$ -Si:H. Из табл. 3 видно, что при применении  $p-i-n$ -структуры для преобразования неконцентрированного солнечного излучения выигрыш КПД от добавления третьего перехода составляет всего 2.5%. В случае возможности синтеза легированных слоев GaPNAs с большими временами жизни неосновных носителей заряда реализация трехпереходного СЭ с  $p-n$ -переходами позволяет повысить КПД до 39%.

В случае преобразования концентрированного излучения выигрыш от использования трехпереходного СЭ с GaPNAs  $p-i-n$ -структурами по сравнению с двухпереходным становится гораздо больше. С одной стороны, это связано с тем, что  $J_{SC}$  в двухпереходном СЭ приблизительно в 1.5 раза больше трехпереходного, и, следовательно, ограничение КПД, связанное с омическими потерями в подложке Si, наступает при меньших концентрациях солнечного излучения. С другой стороны, в случае  $p-i-n$ -структур рекомбинационные потери в  $i$ -области оказывают меньшее влияние при высоком уровне генерации носителей заряда.

#### 4. Заключение

В работе была продемонстрирована перспективность использования твердых растворов GaPNAs для создания высокоэффективных многопереходных СЭ на кремниевых подложках. Было показано, что потенциально достижимые значения КПД трехпереходных СЭ на основе решеточно-согласованных гетероструктур GaPNAs(2 эВ)/GaPNAs(1.5 эВ)/Si (44.5% при AM1.5D 50 Вт/см<sup>2</sup>) не ниже теоретического предела для трехпереходных GaInP/GaAs/Ge СЭ (44.2%).

Также было показано, что двухпереходные солнечные элементы, состоящие из перехода на основе GaPNAs с  $E_g = 1.78$  эВ и перехода на основе Si, могут достигать КПД 30.3% при AM1.5D 100 мВт/см<sup>2</sup>. Использование трехпереходных СЭ на основе GaPNAs  $p-i-n$ -структур целесообразно при преобразовании концентрированного излучения, так как в этом случае удается повысить КПД до 39.62% при AM1.5D 50 Вт/см<sup>2</sup>.

Наиболее значимое влияние на эффективность работы исследуемых фотопреобразовательных гетероструктур оказывает время жизни неосновных носителей заряда фотоактивных слоев на основе GaPNAs. Показано, что для обеспечения необходимого значения тока короткого замыкания, обеспечивающего условия согласования,

время жизни носителей заряда в слоях GaPNAs должно превышать 1 нс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по государственному контракту № 14.516.11.0013.

#### Список литературы

- [1] J.M. Olson, D.J. Friedman, Sarah Kurtz. *High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (N.Y., John Wiley & Sons, Ltd, 2003).
- [2] R.R. King, D.C. Law, K.M. Edmondson et al. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 183 516 (2007).
- [3] M.A. Green. *Proc. IEEE 4th World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion* (Hawaii, USA, 2006) p. 15.
- [4] J.F. Geisz, D.J. Friedman, S.R. Kurtz. *Proc 29th IEEE PVSC* (New Orleans, LA, 2002) p. 864.
- [5] M. Henini. *Dilute nitride semiconductors* (UK, Elsevier, 2005).
- [6] J.F. Geisz, D.J. Friedman. *Semicond. Sci. Technol.*, **17**, 769 (2002).
- [7] M. Güngerich, P.J. Klar, W. Heimbrodt, G. Weiser, A. Lindsay, C. Harris, E.P. O'Reilly. *Dilute III-V Nitride Semiconductors and Material Systems* (Germany, Springer, 2008).
- [8] G. Biwa et al. *J. Cryst. Growth*, **195**, 574, (1998).
- [9] K. Ikeda, H. Xiuxun, B. Boussairi, Y. Ohshita. *Solar Cells — Research and Application Perspectives* (Croatia, InTech, 2013).
- [10] T. Mishima, M. Taguchi, H. Sakata, E. Maruyama. *Sol. Energy Mater. & Solar Cells*, **95**, 18, (2011).

Редактор Е.А. Полянская

#### Design of multijunction GaPNAs/Si heterojunction solar cells by computer modeling

D.A. Kudryashov\*, A.S. Gudovskikh\*<sup>†</sup>, E.V. Nikitina\*, A.Yu. Egorov\*

\* Saint-Petersburg Academic University — Nanotechnology Research and Education Centre Russian Academy of Sciences, 194021 St. Petersburg, Russia

<sup>†</sup> Saint-Petersburg Electrotechnical University „LETI“, 197376 St. Petersburg, Russia

**Abstract** A design calculation of 2- and 3-junction solar cells based on GaPNAs/Si lattice matched heterostructures was done. It was shown that 2-junction solar cells consisting of GaPNAs-based junction with a band gap of 1.78 eV and Si-based junction can reach 30.3% efficiency under AM1.5D 100 mW/cm<sup>2</sup> and 35.4% under AM1.5D 20 W/cm<sup>2</sup>. The maximum efficiency values for 3-junction solar cells consisting of top and middle GaPNAs-based junctions with a band gap of 2 and 1.5 eV respectively and bottom Si-based junction are equal 39.2% under AM1.5D 100 mW/cm<sup>2</sup> and 44.5% under AM1.5D 50 W/cm<sup>2</sup>. The influence of the thickness and minority charge carriers lifetime in photoactive layers on efficiency of developed heterostructures solar cells was shown.