

УДК 539.231

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА $Al_xGa_{1-x}As$ , ПОЛУЧЕННОГО ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИЕЙ

Арустамян Д. А., Чеботарев С. Н., Лунин Л. С., Лунина М. Л., Казакова А. Е.,  
Пащенко А. С.

MODELLING OF THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC  
CONVERTERS BASED ON MULTI-COMPONENT SOLID SOLUTION  $Al_xGa_{1-x}As$ ,  
RECEIVED FROM A LIQUID PHASE EPITAXY

Arustamyan D. A. \*, Chebotarev S. N. \*\*, Lunin L. S. \*\*, Lunina M. L. \*\*, Kazakova A. E. \*,  
Pashchenko A. S. \*\*

\* Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 346428, Russia

\*\* Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, 344006, Russia  
e-mail: galeriandavid@gmail.com

*Abstract.* The most important technological problems of solar energetics are reduction of production costs of photoelectric converters and increase their efficiency. This paper presented a theoretical and experimental study of solar cells based on solid solution  $Al_xGa_{1-x}As$ , received from a liquid phase epitaxy.

The investigated structure was grown by means of liquid phase epitaxy. The GaAs plate was used as a substrate. The  $Al_{0.28}Ga_{0.72}As$  base layer was grown according to the cascade method of refrigeration. Thin emitter layers  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  and a wide bandgap window  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  were produced at lower temperatures (600 °C), from a thin layer of molten aluminum gallium arsenic (0.5 mm thick). The modelling was performed by using AFORS-HET program. During the simulation the following parameters of semiconductor layers were changed: composition of the ternary solution, thickness of the layers, doping level of the layers. Characteristics of the layers for different  $Al_xGa_{1-x}As$  compositions were calculated by means of MATLAB 7 application program package. No defects were supposed to be present in the structure, the temperature of the photoelectric converter and the environment was equal to 300 K, multiplicity of radiation was equal to 1, and the conditions of sunlight lighting were equal to AM 1,5.

The article shows that an optimum composition of the solid solution for the base layer  $Al_{0.28}Ga_{0.72}As$ , is the following: the thickness of layer is 100 microns and the concentration of the acceptor impurity is  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . For the emitter layer  $Al_{0.1}Ga_{0.9}As$  optimum layer thickness is 50 nm, optimum concentration of the donor impurity is  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  and the wide bandgap window  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  optimum thickness is 50 nm, optimum concentration of impurity is  $2.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . The conversion efficiency in this case can reach 40.99 %.

*Keywords:* solar energetics, photoelectric converters, liquid-phase epitaxy, modeling.

Арустамян Давид Арсенович, аспирант кафедры физики и электроники Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова; e-mail: galeriandavid@gmail.com

Чеботарев Сергей Николаевич, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Кристаллы и структуры для твердотельной электроники» Южного научного центра РАН, заведующий кафедрой физики и электроники Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова; e-mail: chebotarev.sergei@gmail.com

Лунин Леонид Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом нанотехнологий, солнечной энергетики и энергосберегающих технологий Южного научного центра РАН, e-mail: lunin\_LS@mail.ru

Лунина Марина Леонидовна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Солнечная энергетика» Южного научного центра Российской академии наук; e-mail: lunin\_LS@mail.ru

Казакова Алена Евгеньевна, аспирант кафедры физики и электроники Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова; e-mail: kazakovaalena92@gmail.com

Пащенко Александр Сергеевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Кристаллы и структуры для твердотельной электроники» Южного научного центра РАН; e-mail: as.pashchenko@gmail.com

Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания на 2016 г. (007-01114-16 ПР), проект (0256-2014-0001), а также при поддержке РФФИ (17-08-01206).

## Введение

В настоящее время во всем мире большое внимание привлекает использование альтернативных источников энергии, огромное количество исследований в этой области связано с развитием солнечной энергетики. Солнечное излучение является неисчерпаемым и экологически чистым источником энергии. В настоящее время стоимость электроэнергии, полученной с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), остается достаточной высокой, в связи с чем идет непрерывное совершенствование солнечных элементов [1–3]. Уменьшить стоимость энергии, полученной с помощью ФЭП, поможет удешевление производства и повышение эффективности преобразования [4].

Одним из основных параметров, характеризующих фотоэлектрические преобразователи является их коэффициент полезного действия (КПД). Ранее авторами данной работы проводились исследования получения фотоактивных слоев солнечных элементов методом ионно-лучевой кристаллизации и зонной сублимационной перекристаллизации [5, 6]. Однако на сегодняшний день наибольшую эффективность преобразования солнечной энергии показывают ФЭП на основе квантовых точек [7, 8] и многокомпонентных соединений [9]. Важным этапом проектирования солнечных элементов является моделирование вольтамперных и спектральных характеристик [10, 11], коэффициента полезного действия [12], свойств границ раздела [13] и других параметров, определяющих эффективность фотоэлектрических преобразователей.

Целью представленной работы являлось теоретическое и экспериментальное исследование эффективности солнечных элементов на основе твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , полученных жидкофазной эпитаксией.

### 1. Теория и описание модели

В качестве объекта исследования выступала  $n^+p^-p^+$  структура на основе многокомпонентного соединения  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на подложке GaAs, показанная на рис. 1.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(n^+)$ Окно
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(n)$ Эмиттер
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}(p^+)$ База
GaAs

Рис. 1. Конструкция моделируемого солнечного элемента

В процессе моделирования менялись следующие параметры полупроводниковых слоев (диапазоны варьирования представлены в табл. 1):

- состав тройного раствора;
- толщина слоев;
- уровень легирования слоев.

Для проведения моделирования требовалось определить такие параметры каждого полупроводникового слоя, как: подвижность электронов и дырок, эффективную плотность состояний в валентной зоне и зоне проводимости, сродство к электрону, диэлектрическую постоянную и ширину запрещенной зоны. Используя подходы, представленные в [14], с помощью пакета прикладных программ MATLAB 7 эти параметры были рассчитаны для различных составов твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x$  менялся в диапазоне 0,1–0,9).

Полученные данные использовались для моделирования в программе AFORS-HET. В процессе моделирования солнечного элемента для каждого полупроводникового слоя были решены уравнение Пуассона

$$\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{q} \frac{\partial^2\phi(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) - n(x,t) + N_D(x) - N_A(x),$$

уравнения непрерывности электронов и дырок

$$-\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x,t)}{\partial x} = G_n(x,t) - R_n(x,t) - \frac{\partial n(x,t)}{\partial t},$$

$$\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x,t)}{\partial x} = G_p(x,t) - R_p(x,t) - \frac{\partial p(x,t)}{\partial t}.$$

Для расчета вольт-амперных характеристик к границам структуры прикладывается внешнее напряжение и производится расчет тока в структуре для каждого значения напряжения. Вольтамперные характеристики позволяют получить значение напряжения холостого хода, тока короткого замыкания и максимальной мощности, с помощью которых определяют коэффициент заполнения ВАХ

$$FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{OC}I_{SC}}$$

и КПД солнечного элемента

$$\eta = FF \frac{V_{OC}I_{SC}}{P_{illum}},$$

Таблица 1. Параметры слоев моделируемого солнечного элемента

Слой	Состав, $x$	Толщина, мкм	Уровень легирования, $\text{см}^{-3}$
$n^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,1–0,9	0,005–0,2	$10^{16} - 5 \cdot 10^{20}$
$n - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,1–0,9	0,005–0,5	$10^{16} - 5 \cdot 10^{20}$
$p^+ - \text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,1–0,9	1–100	$10^{17} - 10^{23}$

где  $P_{illum}$  — плотность мощности падающего излучения.

Предполагалось, что дефекты в структуре отсутствовали, температура фотоэлектрического преобразователя и окружающей среды составляла 300 К, кратность излучения равнялась 1, а условия освещения солнечным излучением соответствовали АМ 1,5.

## 2. Экспериментальная часть

Выращивание исследуемой структуры проводилось с помощью жидкофазной эпитаксии [15]. Её основными преимуществами при выращивании тройных соединений являются:

- простое оборудование, позволяющее обеспечить высокие скорости роста;
- возможность контролировать и изменять стехиометрический состав;
- широкий выбор донорных и акцепторных примесей.

В качестве подложки использовалась пластина GaAs толщиной 150 мкм, легированная Be до  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , рост осуществлялся в среде высокочистого водорода. Базовый слой  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$  толщиной 100 мкм выращивался по методике ступенчатого охлаждения, предусматривающей охлаждение раствора-расплава до величины ниже температуры насыщения (до контакта с подложкой) и выдержку температуры системы подложка-расплав при постоянной температуре 900 °С (после контакта). В качестве примеси использовался Be (концентрация  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ ). Такой способ позволяет получать однородные по составу слои достаточной толщины. Получение тонких слоев эмиттера  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  и широкозонного окна  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  (около 50 нм) производилось при пониженных температурах (600 °С) из тонкого слоя расплава алюминий галлий мышьяк (толщиной 0,5 мм). Слои эмиттера и окна легировались Te до  $10^{16}$  и  $2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  соответственно. Поскольку при высоких концентрациях алюминия твердый раствор AlGaAs является коррозионно-

неустойчивым, были получены 4 структуры с различными составами широкозонного окна и измерены их КПД.

## 3. Результаты и их обсуждение

В работе были рассчитаны предельные значения КПД для различных солнечных элементов на основе AlGaAs/GaAs.

Наибольшее влияние на КПД солнечного элемента оказывают параметры базового слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . В процессе моделирования менялся коэффициент  $x$  с целью определения оптимального состава поглощающего слоя (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что при увеличении параметра  $x$  КПД резко увеличивается и достигает максимума 35,5 % для состава  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ , дальнейшее увеличение доли алюминия в тройном растворе приводит к снижению КПД до 29 %.

Результаты моделирования влияния концентрации примеси базового слоя  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$  на КПД солнечного элемента представлены на рис. 3а.

Анализ полученных данных показывает, что рост концентрации примеси в поглощающем слое приводит к росту КПД. При концентрации примеси  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  КПД составляет 26,07 %. Расчеты показали, что насыщение наступает при концентрации примеси  $10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Однако получать бездефектные полупроводниковые слои с такой степенью легирования достаточно сложно, поэтому целесообразна концентрация примеси в базовом слое не более  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , КПД исследуемой структуры при этом составил 37,28 %.

Важным параметром базового слоя является его толщина, увеличение толщины базы с 1 до 20 мкм приводит к резкому увеличению КПД с 9,28 % (при 1 мкм) до 37,2 % (при 20 мкм). Дальнейшее изменение толщины поглощающего слоя до 100 мкм приводит к росту КПД до 39,93 %, а кривая переходит в насыщение (рис. 3б).

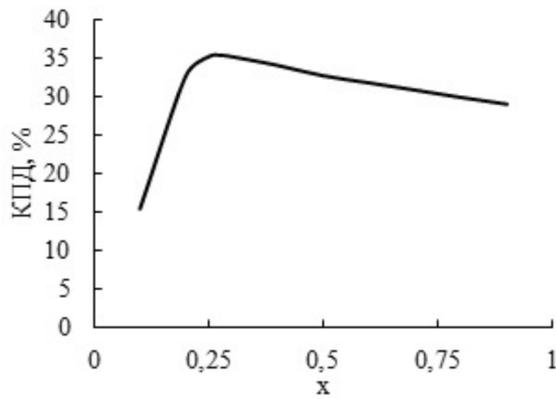


Рис. 2. Зависимость КПД солнечного элемента от параметра  $x$  базового слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

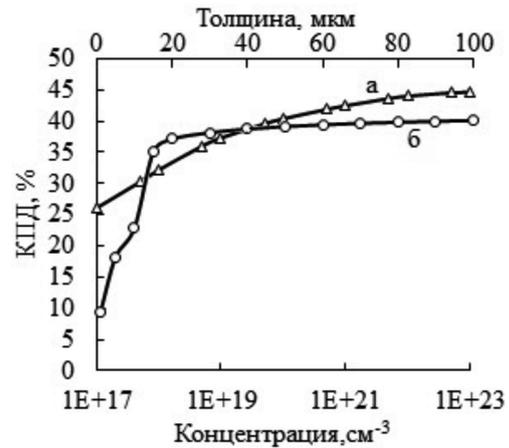


Рис. 3. Зависимость КПД солнечного элемента от: а — концентрации примеси базового слоя  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$ ; б — от толщины

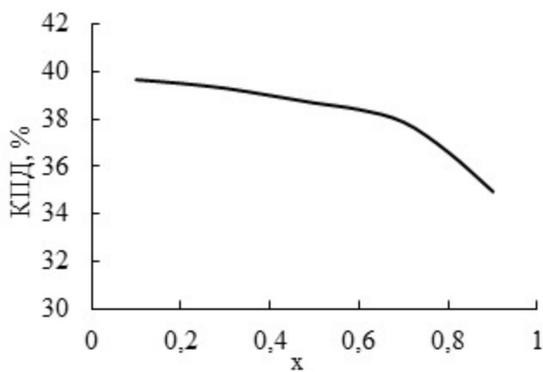


Рис. 4. Зависимость КПД солнечного элемента от параметра  $x$  слоя эмиттера  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

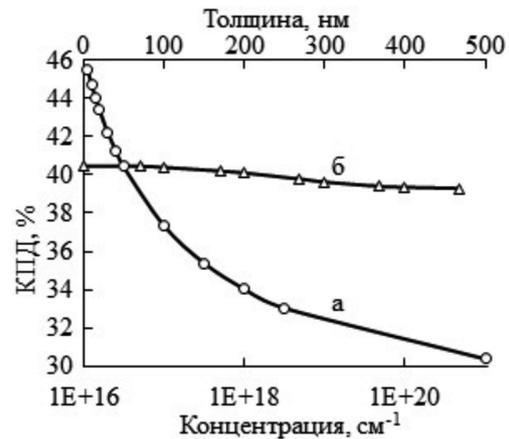


Рис. 5. Зависимость КПД солнечного элемента от: а — толщины эмиттера  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ ; б — концентрации примеси

Для улучшения характеристик солнечных элементов также требуется оптимизация параметров эмиттера. Влияние коэффициента  $x$  эмиттера  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  на КПД исследуемого фотоэлектрического преобразователя представлено на рис. 4.

Расчеты показали, что с эмиттером  $n - \text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  КПД солнечного элемента составил 39,65 %, увеличение доли алюминия в твердом растворе приводит к плавному снижению КПД до 34,93 (при  $x = 0,9$ ).

Важным параметром эмиттера является его толщина, поскольку она влияет на увеличение числа фотогенерированных носителей и их сбор. На рис. 5а представлена зависимость КПД солнечного элемента от толщины эмиттера. При уменьшении толщи-

ны эмиттера с 500 до 5 нм КПД меняется с 30,44 % до 45,54 % соответственно. Однако получение столь тонких слоев сложно технически. Наиболее оптимальным будет использование эмиттера толщиной 50 нм.

Была рассчитана зависимость КПД моделируемой структуры от концентрации примеси в слое эмиттера  $n - \text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  толщиной 50 нм. Как видно из рис. 5б, КПД исследуемого солнечного элемента при концентрации примеси в слое эмиттера  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  может достигать 40,46 %, при увеличении концентрации примеси КПД уменьшается. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что в интервале  $10^{16} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  отсутствует сильная зависимость КПД от  $N_D$ .

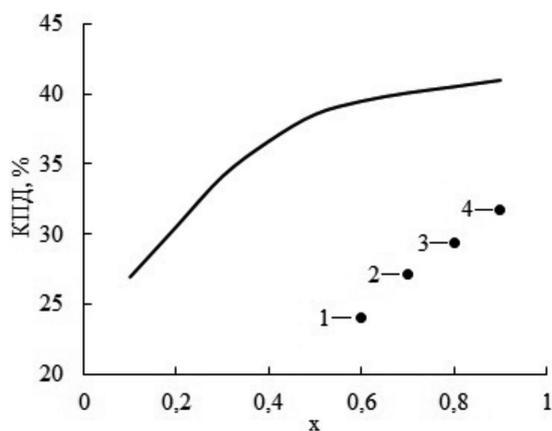


Рис. 6. Зависимость КПД солнечного элемента от параметра  $x$  широкозонного окна  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , точками обозначены КПД структуры полученных с помощью ЖФЭ (1 —  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ , 2 —  $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$ , 3 —  $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ , 4 —  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ )

Слой  $n^+$  —  $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$ , выполняющий роль широкозонного окна, должен быть прозрачен для солнечного излучения и иметь как можно большую ширину запрещенной зоны. На рис. 6 представлены результаты расчетов по влиянию коэффициента  $x$  тройного раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$  на КПД солнечного элемента. КПД для структуры.

Параметр  $x$  менялся от 0,1 до 0,9 (использование твердых растворов с  $x > 0,9$  невозможно из-за коррозионной неустойчивости материала). На рис. 6 видно, что увеличение коэффициента  $x$  и как следствие увеличение ширины запрещенной зоны окна приводит к увеличению КПД вплоть до насыщения (40,99 %), а твердый раствор  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  можно считать оптимальным для использования в качестве широкозонного окна. Точками на рис. 6 обозначены КПД структур с различным составом широкозонного окна, полученных методом жидкофазной эпитаксии. Фотоэлектрические преобразователи на основе твердого раствора  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , показали КПД 31,7 % для окна  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ , 29,4% — для  $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}$ , 27,2 % — для  $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{As}$  и 24 % — для  $\text{Al}_{0,6}\text{Ga}_{0,4}\text{As}$ , что меньше теоретически рассчитанного значения. Этот факт связан с ухудшением совершенства структуры на границе эмиттер–окно. Различие коэффициентов термического расширения и постоянной решетки, вызванное высокой концентрацией алюминия в слое широкозонного

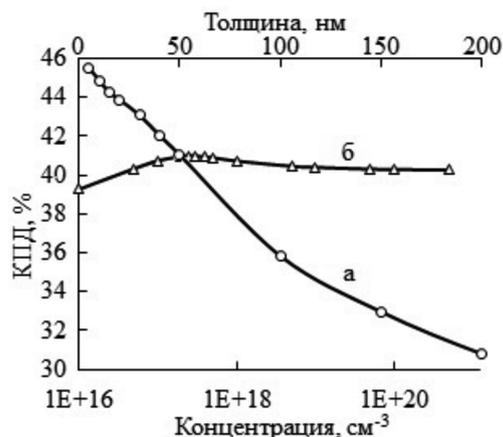


Рис. 7. Зависимость КПД солнечного элемента от: а — толщины широкозонного окна  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ ; б — концентрации примеси

окна по сравнению со слоем эмиттера, приводит к высокой плотности дислокаций.

Тонкие слои твердых растворов  $\text{Al}_x\text{Ga}_{x-1}\text{As}$  (менее 0,1 мкм), близкие по составу к  $\text{AlAs}$  (более 0,8), практически прозрачны для солнечного излучения. На рис. 7а представлены результаты расчетов влияния толщины широкозонного окна на КПД солнечного элемента, из них следует, что ширина окна должна быть как можно меньше.

По техническим причинам целесообразно использовать широкозонное окно  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  толщиной 50 нм. Моделирование зависимости КПД от концентрации примеси окна представлено на рис. 7б. Как видно из рисунка, КПД солнечного элемента растет вплоть до концентрации  $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (КПД при этом составляет 40,99 %), при дальнейшем увеличении концентрации КПД плавно уменьшается.

## Выводы

Таким образом, с помощью программы AFORS-НЕТ было проведено моделирование влияния параметров слоев солнечного элемента на его КПД. Полученные данные показали, что наибольшим КПД обладают фотоэлектрические преобразователи со следующими параметрами слоев:

– Широкозонное окно  $n^+$  —  $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$  толщиной 50 нм с концентрацией примеси  $2,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;

– Эмиттер n —  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  толщиной 50 нм с концентрацией примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;

– База  $p^+$  —  $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}$  толщиной 100 мкм с концентрацией примеси  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

На основе имеющихся данных можно изготовить солнечные элементы с КПД  $\leq 40,99\%$  в условиях освещения AM1,5 без учета затенения токосъемной сеткой и потерь на оптическое отражение. КПД структур, полученных с помощью ЖФЭ, меньше теоретически полученных значений (максимальное значение 31,7%), это может быть объяснено наличием дефектов на границе эмиттер–окно (в процессе моделирования структура предполагалась бездефектной).

### Литература

1. Андреев В.М., Хвостиков В.П., Ларионов В.Р., Румянцев В.Д., Палеева Е.В., Шварц М.З. Высокоэффективные концентраторные (2500 солнц)  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$ -солнечные элементы // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. № 9. С. 1070–1072.
2. Богатов Н.М., Матвеев М.П., Першин Н.В., Родоманов Р.Р. Определение времени захвата неравновесного поверхностного заряда в полупроводниковых структурах по спаду фотоэдс // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2008. № 2. С. 57–61.
3. Богатов Н.М., Корнеев А.И., Матвеев М.П., Родоманов Р.Р. Влияние неравновесного заряда границы  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  на нестационарность спектральной характеристики солнечных элементов с субмикронным  $r$ - $p$ -переходом // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2006. № 4. С. 63–67.
4. Власов А.С., Хвостиков В.П., Карлина Л.Б., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Шварц М.З., Тимошина Н.Х., Лантратов В.М., Минтаиров С.А., Каможный Н.А., Марухина Е.П., Андреев В.М. Концентраторные фотоэлектрические модули со спектральным расщеплением света С солнечными элементами на основе структур  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}/\text{GaSb}$  и  $\text{GaInP}/\text{InGaAs(P)}$  // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 7. С. 106–110.
5. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н. Исследование краевого температурного эффекта при зонной сублимационной перекристаллизации // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. № 5. С. 52–56.
6. Лозовский В.Н., Лозовский С.В., Чеботарев С.Н., Ирха В.А. Осаждение тугоплавких металлов на рельефные подложки методом зонной сублимационной перекристаллизации

// Изв. высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. № 4. С. 68–70.

7. Лунин Л.С., Сысоев И.А., Чеботарев С.Н., Пащенко А.С. Формирование квантовых точек  $\text{InAs}$  на подложках  $\text{GaAs}$  методом ионно-лучевого осаждения // Наука Юга России. 2010. Т. 6. № 4. С. 46–49.
8. Лозовский В.Н., Ирха В.А., Чеботарев С.Н. Методика получения нанометок и их применение для позиционирования в сканирующей зондовой микроскопии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 9. С. 33–36.
9. Gudovskikh A.S., Kaluzhniy N.A., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. Numerical modelling of  $\text{GaInP}$  solar cells with  $\text{AlInP}$  and  $\text{AlGaAs}$  windows // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. Iss. 20. P. 6739–6743. doi: 10.1016/j.tsf.2007.12.016
10. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунина М.Л. Моделирование зависимостей функциональных характеристик кремниевых солнечных элементов, полученных методом ионно-лучевого осаждения, от толщины и уровня легирования фронтального слоя // Наука Юга России. 2011. Т. 7. № 4. С. 25–30.
11. Чеботарев С.Н., Пащенко А.С., Лунин Л.С., Ирха В.А. Моделирование кремниевых тонкопленочных трехкаскадных солнечных элементов  $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{C-Si:O}/\mu\text{C-Si:H}$  // Наука Юга России. 2013. Т. 9. № 4. С. 18–25.
12. Арустамян Д.А., Чеботарев С.Н., Лунина М.Л., Сысоев И.А., Пащенко А.С., Казакова А.Е., Яценко А.Н. Зависимость характеристик солнечных элементов на основе  $\text{AlGaAs}$  от толщины и уровня легирования базы // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2016. № 4 (55). С. 7–12.
13. Мусалинов С.Б., Бычков И.В., Анзулевич А.П., Гудовских А.С. Моделирование двух и трехслойных просветляющих покрытий для гетероструктурных солнечных элементов // Вестник Челябинского государственного университета. 2015. № 7 (362). С. 60–63.
14. Goldberg Yu.A. Handbook series on semiconductor parameters. Vol. 2. World Scientific, London, 1999, P. 1–36.
15. Арсентьев И.Н., Лунин Л.С., Кузнецов В.В., Ратушный В.И., Шликов М.В., Улин В.П., Христенко А.Е., Смолин А.Ю. Получение твердых растворов  $\text{gainp}$  на подложках пористого фосфида индия методом жидкофазной эпитаксии // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 1. С. 14–20.

### References

1. Andreev V.M., Khvostikov V.P., Larionov V.R., Rumiantsev V.D., Paleeva E.V., Shvarts M.Z.

- Vysokoeffektivnyye koncentratornyye (2500 solnc) AlGaAs/GaAs-solnechnyye ehlementy [Highly efficient concentrator (2500 suns) AlGaAs/GaAs solar cells]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technics of Semiconductor], 1999, vol. 33, no. 9, pp. 1070–1072. (In Russian)
2. Bogatov N.M., Matveyakin M.P., Pershin N.V., Rodomanov R.R. Opredelenie vremeni zahvata neravnovesnogo poverhnostnogo zaryada v poluprovodnikovyykh strukturah po spadu fotoehds [Determination of the time the capture of nonequilibrium surface charge in semiconductor structures from the decay of the photo-emf]. *Ehkologicheskij vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ehkonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of research centers of the Black Sea economic cooperation], 2008, no. 2, pp. 57–61. (In Russian)
  3. Bogatov N.M., Korneev A.I., Matveyakin M.P., Rodomanov R.R. Vliyaniye neravnovesnogo zaryada granicy SiO<sub>2</sub>–Si na nestacionarnost' spektral'noy harakteristiki solnechnyykh ehlementov s submikronnym r-n-perekhodom [Influence of nonequilibrium charge SiO<sub>2</sub>–Si boundaries for the nonstationarity of the spectral characteristics of solar cells with submicron p-n-junction]. *Ehkologicheskij vestnik nauchnykh centrov Chernomorskogo ehkonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of research centers of the Black Sea economic cooperation], 2006, no. 4, pp. 63–67. (In Russian)
  4. Vlasov A.S., Khvostikov V.P., Karlina L.B., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Shvarts M.Z., Timoshina N.H., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Kalyuzhnyy N.A., Maruhina E.P., Andreev V.M. Koncentratornyye fotoehlektricheskie moduli so spektral'nykh rasshchepleniyem sveta s solnechnymi ehlementami na osnove struktur AlGaAs/GaAs/GaSb i GaInP/InGaAs(P) [Concentrator photovoltaic modules with a spectral splitting of the light with solar cell structures based on AlGaAs/GaAs/GaSb and GaInP/InGaAs(P)]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [J. of Technical Physics], 2013, vol. 83, no. 7, pp. 106–110. (In Russian)
  5. Lozovskiy V.N., Lozovskiy S.V., Chebotarev S.N. Issledovaniye kraevogo temperaturnogo ehffekta pri zonnoy sublimacionnoy perekristallizatsii [A study of the boundary temperature effect in zone sublimation recrystallization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskije nauki* [Proc. of the higher educational institutions. North-Caucasian region. Series: Engineering], 2007, no. 5, pp. 52–56. (In Russian)
  6. Lozovskiy V.N., Lozovskiy S.V., Chebotarev S.N., Irkha V.A. Osazhdeniye tugoplavkiy metallov na rel'efnykh podlozhki metodom zonnoy sublimacionnoy perekristallizatsii [The deposition of refractory metals on the relief substrate by zone sublimation recrystallization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskije nauki* [Proceedings of the higher educational institutions. North-Caucasian region. Series: Engineering], 2007, no. 4, pp. 68–70. (In Russian)
  7. Lunin L.S., Sysoev I.A., Chebotarev S.N., Pashchenko A.S. Formirovaniye kvantovykh tochk InAs na podlozhkah GaAs metodom ionno-luchevogo osazhdeniya [Formation of InAs quantum dots on GaAs substrates by ion beam deposition]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of Southern Russia], 2010, vol. 6, no. 4, pp. 46–49. (In Russian)
  8. Lozovskiy V.N., Irkha V.A., Chebotarev S.N. Metodika polucheniya nanometok i ih primeneniye dlya pozicionirovaniya v skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [A method of production of nano-markers and their use for positioning in scanning probe microscopy]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Diagnosis materials], 2012, vol. 78, no. 9, pp. 33–36. (In Russian)
  9. Gudovskikh A.S., Kaluzhniy N.A., Lantratov V.M., Mintairov S.A., Shvarts M.Z., Andreev V.M. Numerical modelling of GaInP solar cells with AlInP and AlGaAs windows. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 20, pp. 6739–6743.
  10. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunina M.L. Modelirovaniye zavisimostey funktsional'nykh harakteristik kremniyevykh solnechnyykh ehlementov, poluchennykh metodom ionno-luchevogo osazhdeniya, ot tolshchiny i urovnya legirovaniya frontal'nogo sloya [Modeling dependencies functional characteristics of silicon solar cells, grown by ion-beam deposition, on the thickness and doping level of the front layer]. *Nauka Yuga Rossii* [Sc. of Southern Russia], 2011, vol. 7, no. 4, pp. 25–30. (In Russian)
  11. Chebotarev S.N., Pashchenko A.S., Lunin L.S., Irkha V.A. Modelirovaniye kremniyevykh tonkoplenochnyykh trekhkaskadnykh solnechnyykh ehlementov  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ C-Si:O/ $\mu$ C-Si:H [Modeling of the thin-film three cascade silicon solar cell  $\alpha$ -Si:H/ $\mu$ C-Si:O/ $\mu$ C-Si:H]. *Nauka Yuga Rossii* [Science of Southern Russia], 2013, vol. 9, no. 4, pp. 18–25. (In Russian)
  12. Arustamyan D.A., Chebotarev S.N., Lunina M.L., Sysoev I.A., Pashchenko A.S., Kazakova A.E., Yatsenko A.N. Zavisimost' harakteristik solnechnyykh ehlementov na osnove AlGaAs ot tolshchiny i urovnya legirovaniya bazy [The dependence of the characteristics of the solar cells based on the AlGaAs on the thickness and doping level of the base]. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Bulletin of the North Caucasus Federal University], 2016, no. 4 (55), pp. 7–12. (In Russian)
  13. Musalinov S.B., Bychkov I.V., Anzulevich A.P., Gudovskikh A.S. Modelirovaniye dvuh i

- trekhslojnyh prosvetlyayushchih pokrytij dlya geterostrukturnyh solnechnyh ehlementov [Modeling of two and three-layer antireflection coatings for heterostructure solar cells]. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Chelyabinsk State University], 2015, no. 7 (362), pp. 60–63. (In Russian)
14. Goldberg Yu.A. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*, vol. 2. World Scientific, London, 1999, pp. 1–36.
15. Arsentev I.N., Lunin L.S., Kuznecov V.V., Rastvorov V.I., Shishkov M.V., Ulin B.P., Khristenko A.E., Smolin A.Yu. Poluchenie tverdyh rastvorov gainasp na podlozhkah poristogo fosfida indiya metodom zhidkofaznoj ehpitaksii [Formation of the solid solutions GaInAsP on substrates of porous indium phosphide LPE]. *Poverhnost'. Rentgenovskie, sinhrotronnye i nejtronnye issledovaniya* [Surface. X-ray, synchrotron and neutron investigations], 2006, no. 1, pp. 14–20. (In Russian)

---

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2016

© Арустамян Д. А., Чеботарев С. Н., Лунин Л. С., Лунина М. Л., Казакова А. Е., Пащенко А. С., 2016

Статья поступила 21 октября 2016 г.