

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.383.46

**Арустамян Давид Арсенович, Чеботарев Сергей Николаевич,
Лунина Марина Леонидовна, Сысоев Игорь Александрович,
Пашенко Александр Сергеевич, Казакова Алена Евгеньевна,
Яценко Алексей Николаевич**

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ALGAAS ОТ ТОЛЩИНЫ И УРОВНЯ ЛЕГИРОВАНИЯ БАЗЫ

В статье представлены результаты проведенного моделирования зависимостей характеристик солнечных элементов на основе AlGaAs с помощью программы AFORS-HET от толщины d и уровня легирования N_A базы. Установлено, что увеличение толщины базы с 1 до 10 мкм приводит к резкому увеличению КПД с 9,42 % (при 1 мкм) до 33,03 % (при 10 мкм). Напряжения холостого хода U_{oc} при увеличении толщины базы с 1 до 50 мкм, увеличилось на 95 мВ. Повышение уровня легирования базы приводит к росту тока короткого замыкания (с 13,91 до 23,34 мА/см²). Напряжение холостого хода при этом увеличивается с 1,487 до 1,594 В.

Ключевые слова: солнечные элементы, фотоэлектрические преобразователи, вольтамперная характеристика, внешний квантовый выход.

**David Arustamyan, Sergei Chebotarev, Marina Lunina, Igor Sysoev,
Aleksandr Pashchenko, Alena Kazakova, Alexey Yatsenko
DEPENDENCE OF CHARACTERISTICS OF ALGAAS BASED
SOLAR CELL ON THICKNESS AND DOPING LEVEL BASE**

Simulation of dependencies of characteristics of AlGaAs based solar cell, using AFORS-HET program, on thickness d and doping level N_A base has been performed. It is found that increasing the thickness of the base from 1 to 10 microns leads to a dramatic increase in efficiency with 9,42 % at 1 microns to 33,03 % at 10 microns. Open circuit voltage U_{oc} by increasing the thickness of the base from 1 to 50 microns increased by 95 mV. Increasing the doping level of the base leads to an increase short circuit current from 13,91 to 23,34 mA/cm². The open circuit voltage will be increased from 1.487 to 1.594 V.

Key words: solar cells, photovoltaic, current-voltage characteristic, external quantum efficiency.

Разработка источников фотоэлектрической энергии является важной научно-технической задачей современности. Наибольшие перспективы в этой области связывают с фотоэлектрическими преобразователями на основе кремния [1] и многокомпонентных полупроводников [2]. Для получения фотоэлектрических преобразователей применяют молекулярно-лучевую эпитаксию [3], осаждение из металлоорганических соединений [5] и ионно-лучевую кристаллизацию [14], зонную сублимационную перекристаллизацию [6]. Для исследования их морфологии часто применяют методы зондовой микроскопии [7]. Ранее метод ионно-лучевой кристаллизации был использован нами для выращивания кремниевых слоев [8], квантово-размерных гетероструктур в системе Ge / Si [9] и InAs / GaAs [10]. Параллельно с решением технологических задач нами проводилось также моделирование зависимостей функциональных характеристик солнечных элементов на основе аморфного кремния [11] и квантово-размерных гетероструктур [12]. Одним из способов повышения коэффициента полезного действия фотоэлектрических преобразователей является использование гетероструктур на основе соединений A^{III}B^V [13].

Цель работы состояла в моделировании зависимости характеристик солнечных элементов на основе AlGaAs от толщины и уровня легирования базы.

Объектом исследования выступал солнечный элемент с гомопереходом на основе AlGaAs. В качестве широкозонного окна использовался слой $\text{Al}_{0,8}\text{Ga}_{0,2}\text{As}(n^+)$ с шириной запрещенной зоны E_g , равной 2,09 эВ [15] и концентрацией донорной примеси $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Для n-p-перехода использовались слои $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$. Толщина эмиттера n- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ равна 0,05 мкм уровень легирования $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщина базы p- $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ в процессе моделирования варьировалась от 1 до 20 мкм, а концентрация акцепторной примеси менялась с $1 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Схематически моделируемая структура представлена на рис. 1.

В ходе моделирования температура солнечного элемента и окружающей среды предполагалась равной 300 К. Спектральный состав солнечного излучения соответствовал стандарту для земной поверхности AM 1,5. Диапазон длин волн был от 300 до 800 нм. Кратность солнечного излучения равнялась 1.

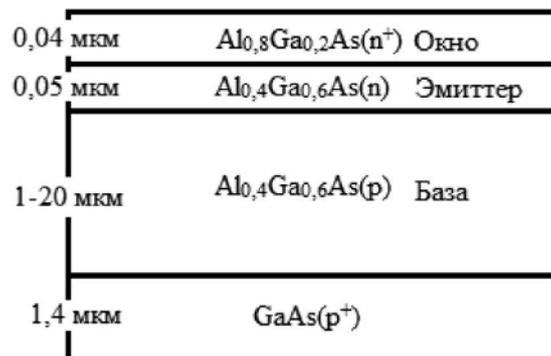


Рис. 1. Конструкция моделируемого солнечного элемента на основе AlGaAs

Моделирование проводилось с использованием программы AFORS-HET v2.5 (automat for simulation of heterostructures). AFORS-HET – это компьютерная программа, позволяющая строить одномерные модели многослойных солнечных элементов. Моделирование основано на численном решении уравнений непрерывности и Пуассона [4].

Уравнение Пуассона и уравнения непрерывности носителей заряда решаются для одномерной модели в фиксированный момент времени. Потенциал $\varphi(x,t)$, концентрации электронов $n(x,t)$ и дырок $p(x,t)$ считаются независимыми переменными, относительно которых решается следующая система уравнений:

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{q} \frac{\partial^2 \varphi(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) - n(x,t) + N_D(x) - N_A(x) + \sum_{trap} \rho_{trap}(x,t) \quad (1)$$

$$-\frac{1}{q} \frac{\partial j_n(x,t)}{\partial x} = G_n(x,t) - R_n(x,t) - \frac{\partial}{\partial t} n(x,t). \quad (2)$$

$$\frac{1}{q} \frac{\partial j_p(x,t)}{\partial x} = G_p(x,t) - R_p(x,t) - \frac{\partial}{\partial t} p(x,t), \quad (3)$$

где q – заряд электрона, ε_0 и ε_r – абсолютная и относительная диэлектрическая проницаемость, N_D и N_A – концентрация ионизированных доноров и акцепторов, G_n и G_p – скорость генерации электронов и дырок, R_n и R_p – скорость рекомбинации электронов и дырок, j_n и j_p – электронный и дырочный ток.

В ходе моделирования полупроводниковые слои предполагались бездефектными (оже-рекомбинация и рекомбинация Шокли – Рида – Холла принимались равными нулю).

С использованием указанных выше параметров слоев в программе AFORS-HET было проведено моделирование зависимостей характеристик солнечных элементов на основе AlGaAs от толщины и уровня легирования базы.

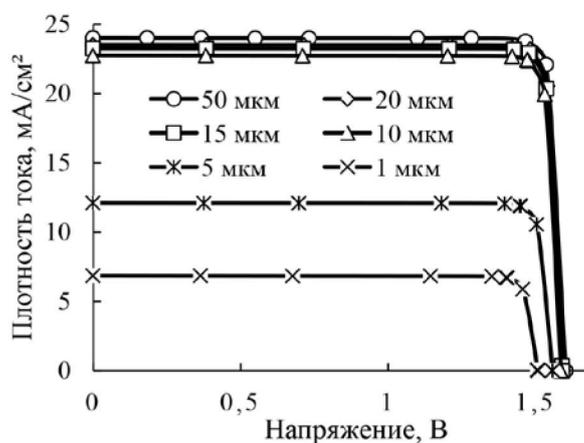
В результате были получены семейства вольтамперных характеристик и спектральных характеристик внешнего квантового выхода, а также зависимости КПД исследуемого солнечного элемента от толщины базы и уровня легирования в ней.

Результаты и обсуждение. Результаты моделирования зависимости вольтамперных характеристик и внешнего квантового выхода представлены на рис. 2. Параметры солнечного элемента, рассчитанные при различной толщине базы AlGaAs(p), отражены в таблице 1. Анализ данных, полученных в результате численного моделирования, показывает, что увеличение толщины базы с 1 до 10 мкм приводит к значительному увеличению тока короткого замыкания I_{sc} и резкому увеличению КПД с 9,42 % (при 1 мкм) до 33,03 % (при 10 мкм), дальнейшее увеличение толщины базы до 50 мкм приводит к небольшому увеличению тока короткого замыкания и КПД. Напряжения холостого хода U_{oc} , при увеличении толщины базы с 1 до 50 мкм, увеличилось на 95 мВ.

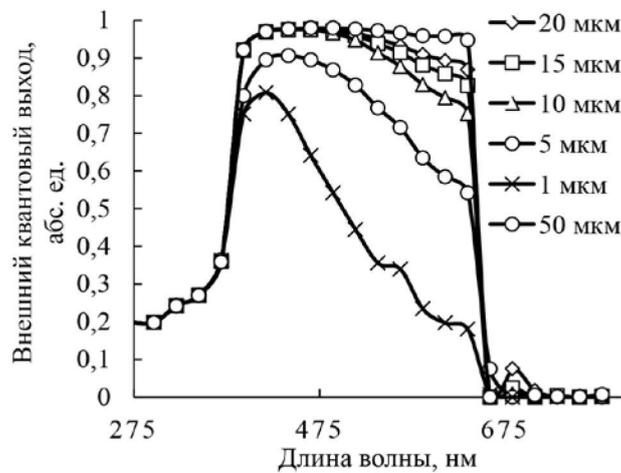
Таблица 1

Зависимость параметров ФЭП от толщины базы

d , мкм	U_{oc} , В	I_{sc} , мА/см ²	FF, %	η , %
50	1,603	24	90,4	34,78
20	1,595	23,51	91,66	34,36
15	1,591	23,24	91,67	33,88
10	1,586	22,74	91,61	33,03
5	1,558	12,1	91,43	17,24
1	1,508	6,86	90,99	9,42



а



б

Рис. 2. Зависимость ВАХ (а) и внешнего квантового выхода (б) солнечного элемента от толщины базы AlGaAs(p)

На рис. 2б представлена спектральная зависимость внешнего квантового выхода (EQE) при различной толщине базы: 450 до 650 нм. Влияние толщины базы на внешний квантовый выход в диапазоне от 340 до 440 нм менее выражено, а в ультрафиолетовой области (< 340 нм) не выявлено вовсе.

На рис. 3а представлены вольтамперные характеристики солнечного элемента при различных уровнях легирования N_A и постоянной толщине ($d = 10$ мкм) базы AlGaAs(p). В ходе моделирования концентрация акцепторной примеси в базе менялась от $1 \cdot 10^{17}$ до $1 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Как видно из рисунка, повышение уровня легирования приводит к росту тока короткого замыкания (с 13,91 до 23,34 мА/см²). Напряжение холостого хода при этом увеличивается с 1,487 до 1,594 В (таблица 2).

Таблица 2

Зависимость параметров ФЭП от уровня легирования базы

N_A , см ⁻³	U_{oc} , В	I_{sc} , мА/см ²	FF, %	η , %
50	1,603	24	90,4	34,78
20	1,595	23,51	91,66	34,36
15	1,591	23,24	91,67	33,88
10	1,586	22,74	91,61	33,03
5	1,558	12,1	91,43	17,24
1	1,508	6,86	90,99	9,42

Спектральные зависимости внешнего квантового выхода для различных уровней легирования базовой области AlGaAs(p) представлены на рис. 3б. Видно, что изменение концентрации N_A с $1 \cdot 10^{17}$ до $1 \cdot 10^{19}$ см⁻³ приводит к небольшому увеличению EQE. Наибольшее изменение внешнего квантового выхода наблюдается в диапазоне длин волн от 400 до 500 нм. Повышение концентрации примеси N_A до $1 \cdot 10^{19}$ см⁻³ приводит к росту EQE в видимой области спектра до 97 %.

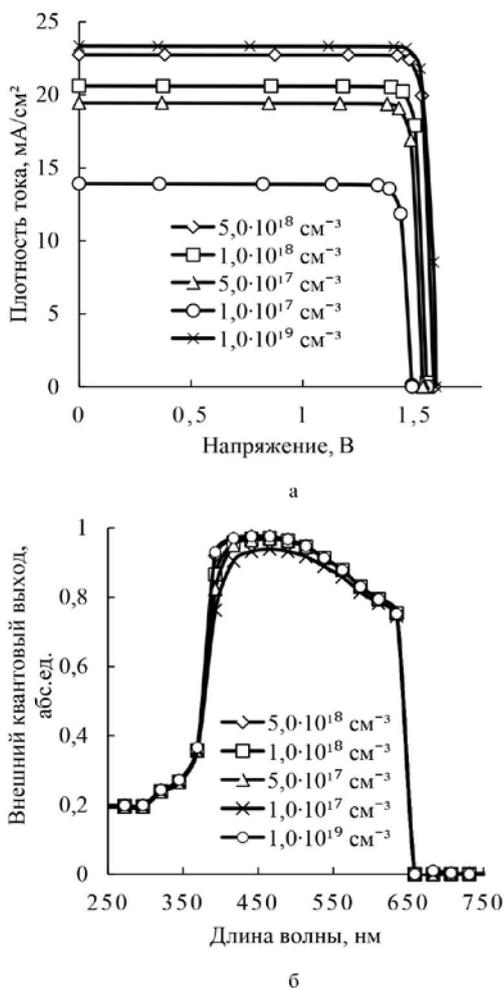


Рис. 3. Зависимость ВАХ (а) и внешнего квантового выхода (б) солнечного элемента от уровня легирования NA базы AlGaAs(p)

На рис. 4 представлены зависимости КПД солнечного излучений от толщины и уровня легирования базы. Из рис. 4а видно, что увеличение до толщины базы до 10 мкм ведет к существенному повышению КПД, дальнейшее увеличение толщины приводит к небольшим изменениям

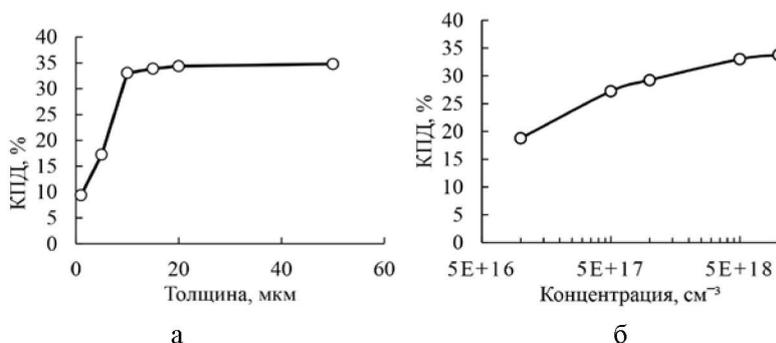


Рис. 4. Зависимость КПД моделируемого солнечного от толщины (а) и уровня легирования (б) базы AlGaAs(p)

Таким образом, с помощью программы AFORS-HEТ было проведено моделирование влияния толщины и уровня легирования базы на характеристики солнечных на основе AlGaAs. Получены семейства вольтамперных характеристик и семейства спектральных зависимостей внешнего квантового выхода и проанализировано влияние на них параметров базы. Установлено, что при толщине базы более 10 мкм КПД моделируемого солнечного элемента превышает 30% при концентрации акцепторной примеси базы $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Полученные теоретические данные могут быть использованы при создании фотоэлектрических преобразователей на основе AlGaAs.

Литература

1. Алфёров Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // *Физика и техника полупроводников*. 2004. Т. 38. № 8. С. 937–948.
2. Андреев В. М., Сорокина С. В., Тимошина Н. Х., Хвостиков В. П., Шварц М. З. Солнечные элементы на основе антимонида галлия // *Физика и техника полупроводников*. 2009. Т. 43. № 5. С. 695–699.
3. Андреев В. М. Гетероструктурные солнечные элементы // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33. № 9. С. 1035–1038.
4. Блохин Э. Е., Арустамян Д. А., Алфимова Д. Л. Моделирование гетероструктуры InGaAs / GaAs для фотодетекторов ближнего ИК-диапазона // *Вестник Южного Научного Центра*. 2015. Т. 11. № 4. С. 16–22.
5. Лантратов В. М. Высокоэффективные двухпереходные GaInP/GaAs солнечные элементы, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии / В. М. Лантратов, Н. А. Калужный, С. А. Минтаиров, Н. Х. Тимошина, М. З. Шварц, В. М. Андреев // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 41. № 6. С. 751–755.
6. Лозовский В. Н., Лозовский С. В., Чеботарев С. Н. Моделирование массопереноса примесей при зонной сублимационной перекристаллизации в цилиндрической ростовой зоне // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2006. № 3. С. 60–63.
7. Лозовский В. Н. Получение и использование позиционных меток в сканирующей зондовой микроскопии / В. Н. Лозовский, С. Н. Чеботарев, В. А. Ирха, Г. В. Валов // *Письма в Журнал технической физики*. 2010. Т. 36. № 16. С. 1–5.
8. Лунин Л. С. Ионно-лучевое осаждение фотоактивных нанослоев кремниевых солнечных элементов / Л. С. Лунин, С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, Л. Н. Болобанова // *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48. № 5. С. 517–522.
9. Чеботарев С. Н. Особенности формирования многослойных наноструктур Ge / Si при ионно-лучевой кристаллизации / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, Л. С. Лунин, В. А. Ирха // *Письма в Журнал технической физики*. 2013. Т. 39. № 16. С. 30–37.
10. Чеботарев С. Н. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур InAs / GaAs (001) / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, А. Williamson, Л. С. Лунин, В. А. Ирха, В. А. Гамидов // *Письма в Журнал технической физики*. 2015. Т. 41. № 13. С. 102–110.
11. Чеботарев С. Н. Моделирование кремниевых тонкопленочных трехкаскадных солнечных элементов α -Si:H / μ C-Si:O / μ C-Si:H / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, Л. С. Лунин, В. А. Ирха // *Вестник Южного научного центра РАН*. 2013. Т. 9. № 4. С. 18–25.
12. Чеботарев С. Н. Моделирование вольтамперных и спектральных характеристик солнечных элементов InAs-QD / GaAs / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, В. А. Ирха, С. А. Дудников // *Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал*. 2013. № 10 (132). С. 28–32.
13. Чеботарев С. Н. Ионно-лучевая кристаллизация мультикаскадных фотогетероструктур InAs-QD / GaAs / С. Н. Чеботарев, А. С. Пашенко, В. А. Ирха, С. А. Дудников // *Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал*. 2013. № 6-2 (128). С. 43–48.
14. Lunin L. S. A study of photosensitive InAs/GaAs heterostructures with quantum dots grown by ion-beam deposition / L. S. Lunin, I. A. Sysoev, D. L. Alfimova, S. N. Chebotarev, A. S. Pashchenko // *X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques: Journal of Surface Investigation*. 2011. Т. 5. № 3. P. 559–562.
15. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys // *Journal of Applied Physics*. 2001. Vol. 89. № 11. P. 5815–5876.