5. Ноден П., Ките К. Алгоритмическая алгоритмика. М.: Мир, 1999. С. 720.

6. Акушский И. Я., Юдицкий Д. М. Машинная арифметика в остаточных классах. М.: Советское радио, 1968. С. 440.

7. Damu Radhakrishnan. A fast RNS galois field multiplier // Yong Yuan Department. Department of Electronic English, Idaho University Moscow, ID DOI: 10.1109/ISCAS.1990.112619. Circuits and Systems, IEEE International Symposium on Source: IEEE Xplore. 1990.

8. Малашевич Б. М., Малашевич Д. Б. Отечественные модулярные и троичные ЭВМ // 50 лет модулярной арифметике. Зеленоград, 2005. С. 107.

9. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: учебное пособие для вузов. 2 е издание. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. С. 634.

10. Гранкин В. В., Мезенцева О. С. К вопросу о реализации модулярных вычислителей элементарных функций в среде LabVIEW и их реализации на ПЛИС // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Инфокоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». Ставрополь: СевКавГТИ, 2014. С. 248–254.

## УДК 621.382:621.315.592

## Девицкий Олег Васильевич, Сысоев Игорь Александрович

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР ALXGA1-XAS – INXGA1-XAS – GAAS<sup>1</sup>

В программе Silvaco TCAD выполнено моделирование электрических параметров солнечных элементов на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs в условиях AM 1.5 при различных значениях параметра х. Показано, что солнечные элементы на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs потенциально имеют большую эффективность по сравнению с эффективностью обычных солнечных элементов. Ключевые слова: наногетероструктуры, фотовольтаика, солнечная энергетика, фотоэлектрический преобразователь, солнечный элемент, Silvaco TCAD, моделирование солнечных элементов.

Oleg Devitsky, Igor Sysoev SIMULATION OF SOLAR CELLS BASED ON HETEROSTRUCTURES AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs

The program Silvaco TCAD simulated electrical parameters of solar cells based on AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs under AM 1.5 for different values of x. It is shown that the solar cells on the basis of AlxGa1xAs – InxGa1-xAs – GaAs may be quite higher efficiency compared to the efficiency of conventional solar cells. **Key words:** heterostructure, photovoltaics, solar energy, photoelectric converter, solar cell, Silvaco TCAD, modeling of solar cells.

В настоящее время исследованию каскадных солнечных элементов на основе полупроводниковых гетероструктур A3B5 посвящено большое количество работ, на многих отечественных и зарубежных конференциях по фотовольтаике таким исследованиям уделяется достаточно большое внимание. В большинстве этих работ красной нитью проходит идея расширения области поглощения света за счет использования узкозонных вставок в виде квантовых ям или многопереходных гетероструктур для увеличения фототока. Распространено мнение, что наиболее сильное увеличение фототока и соответственно эффективности элемента возможно при создании в его базовой области сильного электрического поля, в соответствии с этим моделируются солнечные элементы со структурой p - i - n. Нами же будет рассмотрен вопрос, затрагивающий оптимально возможные условия, при каких возможно достичь максимальной эффективности многопереходного солнечного элемента на основе

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания по проекту №2014/216, код проекта: 2516.



AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs и как она может сравниться с максимально достижимой эффективностью обычных солнечных элементов. В данной работе выполнено теоретическое моделирование электрических параметров солнечных элементов на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs в условиях AM 1.5 с помощью среды Silvaco TCAD и проведено сравнение с кпд фотопреобразования для обычных солнечных элементов.

Программа Silvaco TCAD (Technology Computer Aided Design) [1] предназначена для моделирования фотоэлектрических процессов в различных полупроводниковых структурах, в том числе и в гетероструктурах на основе полупроводников AIIIBV. С помощью неё возможно моделирование фототока, эффективности фотопреобразования при различной атмосферной массе в слоях AlxGa1-xAs и InxGa1-xAs с различным значением параметра х. В программе учтены несколько моделей, которые могут, например, учитывать отличие в ширинах запрещенных зон полупроводниковых материалов (при чередовании слоев барьерного материала и квантовых ям и при чередовании слоев двух различных полупроводниковых материалов, имеющих различную величину ширины запрещенной зоны).

При описании математической модели многопереходного солнечного элемента на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs мы руководствовались принципом, который основывается на рассмотрении электрофизических процессов в отдельных *p*-*n*-переходах. Общая модель многопереходного солнечного элемента на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs получается, в результате суперпозиции моделей отдельных *p*-*n*-переходов и соединяющих их слоев. Структура многопереходного солнечного элемента и электрофизические, характеристики его слоев не имеют существенных отличий в различных точках поверхности элемента. Рассмотрим все процессы в одномерном случае, запишем систему основных уравнений для многопереходного солнечного элемента на основе AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs преобразуется к одномерному случаю:

$$\begin{cases} \frac{d}{dz} \left( -\mu_n E\left(z\right) n\left(z\right) - D_n \frac{dn\left(z\right)}{dz} \right) + r\left(n, p\right) = G\left(z\right) \\ \frac{d}{dz} \left( \mu_p E\left(z\right) p\left(z\right) - D_p \frac{dp\left(z\right)}{dz} \right) + r\left(n, p\right) = G\left(z\right) \\ \frac{dE}{dz} = \frac{4\pi q}{\varepsilon} \left( N_a\left(z\right) - N_d\left(z\right) - p\left(z\right) + n\left(z\right) \right), \end{cases}$$
(1)

где  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – коэффициенты подвижности электронов и дырок, n(z), p(z) – концентрации электронов и дырок,  $D_n, D_p$  – коэффициенты диффузии, r(n, p) и G(z) – функции рекомбинации и генерации, Е – напряженность электрического поле, q – элементарный заряд,  $N_d$  и  $N_a$  – концентрации доноров и акцепторов, z – связанная с субэлементом локальная координата.

В солнечных элементах на основе гетероструктур AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs с используется тонкий слой p-AlxGa1-xAs в качестве широкозонного окна, который практически полностью прозрачен для солнечного излучения. Потенциальное увеличение КПД элементов достигается в каскадных солнечных элементах, которые изготавливаются на основе многослойных гетероструктур AlxGa1-xAs – InxGa1-xAs – GaAs с несколькими *p-n*-переходами в полупроводниках с различной шириной запрещенной зоны [2].

Для тройных полупроводниковых соединений типа AlxGa1-xAs и InxGa1-xAs изменение основных электрофизических характеристик, в том числе и значения величины запрещенной зоны Eg, достигается при изменении параметра состава х. Таким образом, открывается перспектива создания варизонных солнечных элементов.

Для дальнейших расчетов наиболее важным параметром являются ширина запрещенной зоны Eg. Зависимости величины ширины запрещенной зоны Eg от состава х для *p-n* переходов AlxGa1-xAs и InxGa1-xAs, описываются формулами [3, 4]:

$$E_{g1(AIGaAs)}(x) = 1,424 + 1,247 \cdot x, npu \, x < 0,45 \,, \tag{2}$$

$$E_{g2(A|GaAs)}(x) = 1,9 + 0,125 \cdot x + 0,143 \cdot x^{2}, npu \, x > 0,45,$$
(3)

$$E_{g(InGaAs)}(x) = 0,36 + 0,63 \cdot x + 0,43 \cdot x^{2} .$$
<sup>(4)</sup>

На рис. 1 представлены графики зависимостей, полученные с помощью соотношений (2, 3), для AlxGa1-xAs и соотношения (4) для InxGa1-xAs.



Рис. 1. Графики зависимостей ширины запрещенной зоны Eg от параметра состава х для AlxGa1-xAs и InxGa1-xAs

Анализируя графики зависимостей, приведенные на рис. 1, следует отметить, что при повышений концентрации x в интервале от нуля до 0,8 ширина запрещённой зоны Eg AlxGa1-xAs соответственно возрастает. В результате ширина спектра светового потока для InxGa1-xAs растёт. Также можно учесть, что ширина запрещенной зоны Eg для InxGa1-xAs возрастает с увеличением параметра x при фиксированном значении Eg для AlxGa1-xAs в результате чего разность значений  $\Delta$ Eg уменьшается.

Очевидно, что увеличение х от ноля до 0,8 увеличивает ширину запрещённой зоны Eg AlxGa1xAs от 1,424 до 2,092 эВ, а InxGa1-xAs – от 0,99 до 1,265 эВ, что делает возможным реализовать эту структуру как простейшую ячейку многопереходного солнечного элемента с заданной шириной спектра поглощения.

В результате моделирования для каждого состава *p*-*n*-перехода были получены ВАХ, изображенные на рис. 2. Также найдены необходимые электрические параметры и КПД элемента, представленные в таблице 1.



Основные электрические параметры находились по формулам [5]:

$$P_{m0E} = I_{mp} U_{mp}$$
(5)

$$FF = \frac{P_{m0E}}{I_{:7}U_{EE}} = \frac{I_{mp}U_{mp}}{I_{:7}U_{EE}}.$$
(6)

$$\eta = \frac{P_{m0E}}{P_{2E}} = \frac{I_{mp} \cdot U_{mp}}{P_{2E}}.$$
(7)

Таблица 1

### Электрические параметры AlxGa1-хAs при разных значениях х

Состав <i>р-п</i> -перехода	E <sub>g</sub> , эB	I <sub>к3</sub> , мА/см <sup>2</sup>	V <sub>xx</sub> , B	FF	КПД, %
Al0.70Ga0.30As	2,06	17,61	2,22	0,8370	24,30
Al0.36Ga0.64As	1,87	18,40	1,15	0,7881	12,41
Al0.2Ga0.8As	1,67	20,45	0,90	0,7635	10,50



Рис. 2. Графики ВАХ для четырех одиночных *p-n*-переходов AlxGa1-xAs с различным составом х

Из графика ВАХ, изображенного на рис. 2, видно, что наибольшую эффективность  $\eta = 24,3 \%$  имеет переход с  $E_{g1} = 2,06$  эВ, имеющий наибольшую концентрацию х. С уменьшением концентрации х наблюдаем заметное снижение всех электрических параметров элемента.

Аналогично был промоделирован двухкаскадный элемент с шириной запрещенной первого  $E_{g1} = 2,06$  эВ и второго  $E_{g2} = 1,87$  эВ перехода, график, полученных ВАХ элемента изображен на рисунке 3.

Отметим, что для двухкаскадного элемента характерно влияние верхнего перехода, это заметно по увеличению напряжения холостого хода до Vxx = 3,38 В. Плотность тока составила  $I_{ss} = 17.11 \text{ мA/cm}^2$ , FF = 0,833, а общая эффективность существенно увеличилась с 24,3 % до 35,5 %.



Рис. 3. Графики ВАХ для двухкаскадного солнечного элемента

Для трехкаскадного элемента с тремя переходами  $E_{g1} = 2,06$  эВ,  $E_{g2} = 1,87$  эВ и  $E_{g3} = 1,67$  эВ, график ВАХ которого изображен на рисунке 4. Анализируя ВАХ, заметим, что, как для двухкаскадного, так и для трехкаскадного характерно понижение плотности тока до  $I_{s3} = 14.16$  мА/см<sup>2</sup> и повышение напряжение холостого хода  $V_{xx} = 4,28$  В. КПД элемента также увеличилось и составило 38,8 % при значении FF = 0,872.



Рис. 4. Графики ВАХ для трехкаскадного солнечного элемента



Таблица 2

Основные результаты моделирования элементов обобщены в таблице 2.

электри теские параметры многопереходных элементов								
Количество <i>р-п-</i> переходов	Ікз, мА/см <sup>2</sup>	Vxx, B	FF	КПД, %				
Однопереходной	17,61	2,22	0,8370	24,30				
Двухпереходной	17.11	3,38	0,833	35,5				
Трехпереходной	14.16	4,28	0,872	38.8				

Электрические параметры многопереходных элементов

Исходя из анализа данных таблицы 2 видно, что увеличение напряжение холостого хода Uxx, а также количества переходов значительно повышает КПД элемента. Однако изготовление элементов с количеством переходов больше чем четыре нецелесообразно ввиду усложнения технологических процессов. Поэтому для дальнейшего увеличения КПД трехкомпонентных элементов необходимо уменьшить плотность дефектов в активных слоях гетероструктуры, и количество дефектов на границах раздела *p-n*-переходов. именно эти факторы улучшают процесс собирания.

Обобщая результаты моделирования, отметим, что:

- достижение максимальной выходной мощности трёхкомпонентных элементов требует взаимного сопряжения по плотности тока широко- и узкозонного *p-n*-переходов. Это достигается тем, что при неизменном значении ширины запрещенной зоны Eg одного из переходов подбирается материал с оптимальным значением Eg второго перехода;
- оптимальные значения параметра состава х для переходов, обеспечивающие максимальную эффективность трехпереходного элемента, лежат в интервале от 0,2 до 0,7. Эти данные хорошо согласуются с результатами, опубликованными в ряде зарубежных литературных источников.

#### Литература

1. Atlas – Device Simulation Framework. [Электронный ресурс] URL: http://www.silvaco.com/products/ tcad/device\_simulation/atlas/atlas.html (дата обращения 12.02.2015).

2. Сысоев И. А., Девицкий О. В. Моделирование процесса получения твердых растворов соединений A3B5 градиентной эпитаксией // Всероссийская научная конференция «Мир науки глазами современной молодежи»: сборник научных трудов (Ставрополь, 15 декабря 2014 г.). Ставрополь, 2014.

3. NSM Archive – Aluminium Gallium Arsenide (AlGaAs) – Band structure and carrier concentration. [Электронный pecypc]. URL: http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/bandstr.html (дата обращения 01.03.2015).

4. NSM Archive – Gallium Indium Arsenide GaInAs) – Band structure. [Электронный ресурс] URL: http:// www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAs/bandstr.html (дата обращения 01.03.2015).

5. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Ч. 2., М.: Мир, 1984. 456 с.