

УДК 519.632

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.10

В.Н. Корчагин^{1,2}, И.А. Сысоев³, Д.В. Митрофанов³¹Федеральный исследовательский центр «Южный научный центр»
Российской академии наук, Ростов-на-Дону, Россия²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, Новочеркасск, Россия³Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

n-GaInAsP/*p*-Si В ПРОГРАММЕ AFORS-HET v.2.5

Процесс численного моделирования является важным этапом при получении новых солнечных элементов, так как исключает траты на разработку, получение и исследование их прототипов. В данной работе проведен расчет основных параметров модели солнечного элемента на базе хорошо развитой для этих целей программы Afors-HET v.2.5. Промоделированы последовательно характеристики солнечного элемента в зависимости от толщины, уровня легирования слоёв, температуры и текстуры поверхности солнечного элемента. **Цель исследования:** моделирование и исследование вольтамперной и спектральной характеристик гетероструктуры *n*-Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/*p*-Si. **Методы:** для исследования взят метод численного моделирования. Построены зависимости коэффициента полезного действия от толщины эмиттера в диапазоне 200–1000 нм, уровня легирования примесями в диапазоне $1 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, температуры от 300 до 400 К. Получены зависимости эффективности, напряжения холостого хода, тока короткого замыкания от толщины эмиттера. **Результаты:** представленные результаты демонстрируют, что максимум эффективности 22,31 % достигнут при толщине эмиттера 200 нм, концентрации донорной примеси $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрации акцепторной примеси $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Влияние текстуры поверхности в виде инвертированных пирамид под углом $44,8^\circ$ приводит к повышению эффективности от 22,31 до 22,34 %. В результате моделирования было установлено, что максимальным значением коэффициента полезного действия солнечного элемента, равного 22,34 %, при плотности тока короткого замыкания $38,24 \text{ мА/см}^2$, напряжении холостого хода 699,8 мВ и факторе заполнения 84,29 % обладает солнечный элемент с составом Ga_{0,95}In_{0,05}As_{0,05}P_{0,95}/Si. **Практическая значимость:** впервые описано моделирование текстуры поверхности солнечного элемента инвертированными пирамидами в программе Afors-HET. Таким образом, солнечный элемент на гетероструктуре *n*-GaInPAs/*p*-Si по всем основным параметрам является конкурентоспособным многим однопереходным солнечным элементам.

Ключевые слова: гетероструктуры, *n*-GaInAsP/*p*-Si, AFORS HET v.2.5, солнечные элементы, фотоэлектрические преобразователи, многокомпонентные твердые растворы, A³B⁵.

V.N. Korchagin^{1,2}, I.A. Sysoev³, D.V. Mitrophanov³

¹Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Russian Federation

³North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

SIMULATION OF FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF SOLAR CELL BASED ON n-GaInAsP / p-Si HETEROSTRUCTURE IN AFORS-HET V.2.5 SOFTWARE

The process of numerical modeling is an important step in obtaining new solar cells, since it eliminates the costs of developing, obtaining and researching their prototypes. In this work, the main parameters of the solar cell model were calculated on the Afors-HET v.2.5 program, which is well developed for these purposes. The characteristics of the solar cell were modeled sequentially depending on the thickness, doping level of the layers, temperature and texture of the solar cell surface. **Purpose:** modeling and research of current-voltage and spectral characteristics of the $n\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Si}$ heterostructure. **Methods:** for the study, a numerical simulation method was taken. The dependences of the efficiency on the emitter thickness in the range 200–1000 nm, the level of doping with impurities in the range $1 \cdot 10^{16}$ – $1 \cdot 10^{19}$ cm⁻³, temperatures from 300 to 400 K were obtained, short-circuit current from the thickness of the emitter. **Results:** the presented results demonstrate that the maximum efficiency of 22,31 % is achieved at an emitter thickness of 200 nm, a donor impurity concentration of $3 \cdot 10^{17}$ cm⁻³, an acceptor impurity concentration of $2 \cdot 10^{17}$ cm⁻³. The effect of surface texture in the form of inverted pyramids at an angle of 44,8° leads to an increase in efficiency from 22,31 to 22,34 %. As a result of the simulation, it was found that the maximum value of the efficiency of the solar cell equal to 22,34 %, with a short-circuit current density of 38,24 mA/cm², an open circuit voltage of 699,8 mV and a fill factor of 84.29% is possessed by a solar cell with composition Ga_{0.95}In_{0.05}As_{0.05}P_{0.95}/Si. **Practical relevance:** for the first time, the modeling of the surface texture of a solar cell by inverted pyramids in the Afors-HET program is described. Thus, a solar cell based on an $n\text{-GaInPAs}/p\text{-Si}$ heterostructure is competitive in all basic parameters to many single-junction solar cells.

Keywords: heterostructures, GaInPAs/Si, AFORS HET, solar cells, multicomponent solid solutions, A³B⁵, photovoltaic converters.

Введение

Переход к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) происходит с ускорением во всём мире, это прежде всего связано с экологичностью ВИЭ. На долю солнечной энергетики приходится всего несколько процентов от общемировой энергетики, но рост количества солнечных электростанций, по данным Международного энергетического агентства (МЭА) [1], является самым высоким. На рис. 1 показан имеющийся и возможный рост установленной мощности для ВИЭ с 2019 по 2022 г. Видно, что объём и прирост солнечной энергетики самые высокие среди всех ВИЭ.

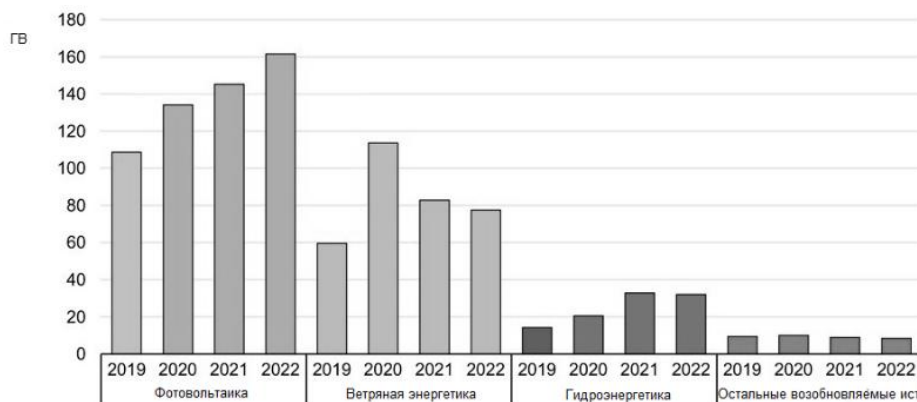


Рис. 1. Чистый прирост мощностей возобновляемых источников по технологиям согласно данным МЭА [1]

Хотя сама солнечная энергия бесплатна, высокая стоимость ее преобразования и хранения по-прежнему ограничивает ее использование во многих местах. За каждый процент эффективности СЭ идёт борьба во всём мире, и в связи с этим вопрос моделирования и симуляции новых СЭ является, как никогда, актуальным. При дальнейших разработках новых материалов для солнечных элементов (СЭ), альтернативных методов исследований, в том числе моделирования, и производства, произойдёт снижение цены за киловатт данного вида электроэнергии, что поспособствует доступности её во многих странах.

Процесс численного моделирования является важным этапом при получении новых СЭ, так как исключает траты на разработку, получение и исследование прототипов СЭ. На данный момент моделированию СЭ посвящается множество научных работ, в том числе на базе программы Afors-NET [2–8]. Большая часть исследований по моделированию в фотовольтаике относится к СЭ на кремниевых подложках, как и объём их производства [8], что является проблемой для исследований в области других «незамеченных» полупроводников. С другой стороны, в последнее время активно исследуют многокомпонентные соединения на базе A^3B^5 для получения более эффективных СЭ [9–10]. В ранних работах коллег по научному центру проводилось моделирование бинарных и трёхкомпонентных соединений типа GaP и GaAsP [6] на кремнии, что подтолкнуло к исследованию более сложного состава. Тот факт, что с добавлением индия диффузионная длина носителей заряда в $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ увеличивается, играет важную роль для исследования.

Впервые в программном продукте Afors-НЕТ применялся метод текстурирования поверхности СЭ $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{Si}$ инвертированными пирамидами, что повысило выходные характеристики исследуемого СЭ.

Целью данной работы являются моделирование и построение зависимостей коэффициента полезного действия (КПД), I_{sc} , U_{oc} от толщины эмиттера, концентрации примесей, температуры и текстуры поверхности гетероструктуры $n\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Si}$. Результаты данного исследования помогут в дальнейшем в разработке и получении СЭ на основе гетероструктуры многокомпонентного твёрдого раствора $n\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/p\text{-Si}$, а также дают возможность обратить внимание на текстуру поверхности данного СЭ.

Экспериментальная часть

Компьютерная программа Afors-НЕТ v.2.5 (Центр материалов и энергии имени Гельмгольца, г. Берлин), в которой было проведено моделирование, основана на диффузионно-дрейфовой модели, включающей уравнения Пуассона, непрерывности и переноса электронов и дырок [4–6]. При моделировании СЭ в AFORS НЕТ необходимо определить основные параметры полупроводниковых слоев, такие как:

- 1) ширина запрещенной зоны E_g ;
- 2) сродство к электрону;
- 3) диэлектрическая постоянная;
- 4) эффективная плотность состояний в валентной зоне N_v ;
- 5) эффективная плотность состояний в зоне проводимости N_c ;
- 6) подвижность электронов и дырок;
- 7) тепловая скорость электронов и дырок;
- 8) плотность.

Эти параметры рассчитаны по правилу Вегарда (1) [11, 12], при использовании постоянных величин для бинарных соединений InAs , InP , GaAs , GaP [13–16]:

$$b(x,y) \sim (1-x)y \cdot b_{\text{InAs}} + (1-x)(1-y)b_{\text{InP}} + xy \cdot b_{\text{GaAs}} + x(1-y)b_{\text{GaP}}, \quad (1)$$

где $b(x,y)$ – это искомый параметр, а x и y – это стехиометрические коэффициенты.

Конструкция моделируемого СЭ приведена на рис. 2, на котором контакты приняты как омические. Скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок S_n и S_p на границе контактов составляла 10^7 см/с.

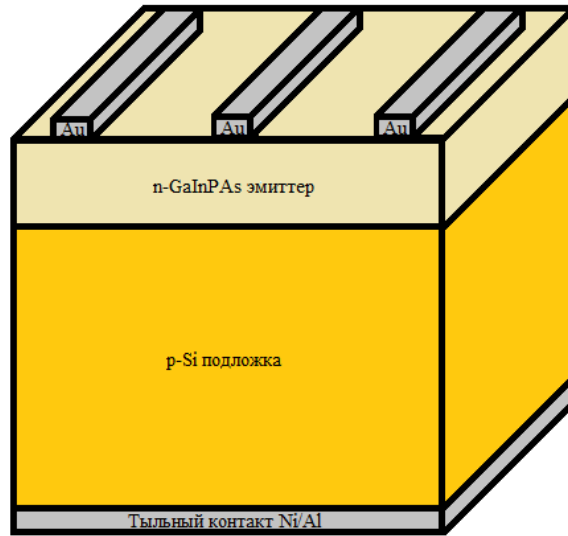


Рис. 2. Конструкция моделируемого солнечного элемента на базе гетероструктуры $n\text{-GaInAsP}/p\text{-Si}$

В данной работе была построена зависимость ширины запрещённой зоны E_g для $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ от параметра кристаллической решётки. В качестве подложки для СЭ использовался Si , при этом состав эмиттера $\text{Ga}_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{As}_{0,05}\text{P}_{0,95}$ имеет рассогласование периода кристаллической решётки с кремнием 0,944 % (рис. 3), что принято считать эпитаксиальным слоем [16–8].

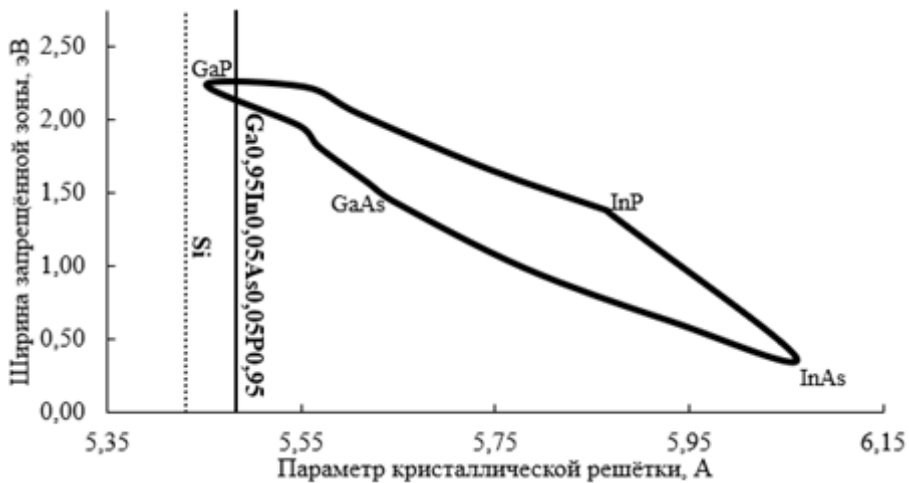


Рис. 3. Зависимость ширины запрещенной зоны от параметра кристаллической решётки в твёрдом растворе GaInAsP

Оптимальным составом гетероструктуры данного исследования является $\text{Ga}_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{As}_{0,05}\text{P}_{0,95}$, так как ширина запрещённой зоны эмиттера равняется 2,17 эВ, тем самым увеличивая спектральную чувствительность, что приводит к повышению КПД СЭ. Количество точечных дефектов в *p*-базе равнялось 10^{15} см^{-2} , в *n*-эмиттере 10^{10} см^{-2} .

Зависимости КПД СЭ от толщины эмиттера, уровня легирования были посчитаны с помощью моделирования вольтамперной характеристики (ВАХ).

ВАХ солнечного элемента отражает зависимость исходящего тока солнечного элемента от напряжения на его контактах (рис. 4), основным уравнением которой является следующее:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

где V – напряжение, T – температура, I – ток, который протекает через нагрузку, I_{ph} – величина генерируемого тока, I_s – ток сатурации, n – фактор идеальности выпрямительного *p-n*-перехода, k – заряд электрона, R_s – последовательное сопротивление, R_{sh} – параллельное сопротивление. Ниже на рис. 4 показана эквивалентная схема СЭ.

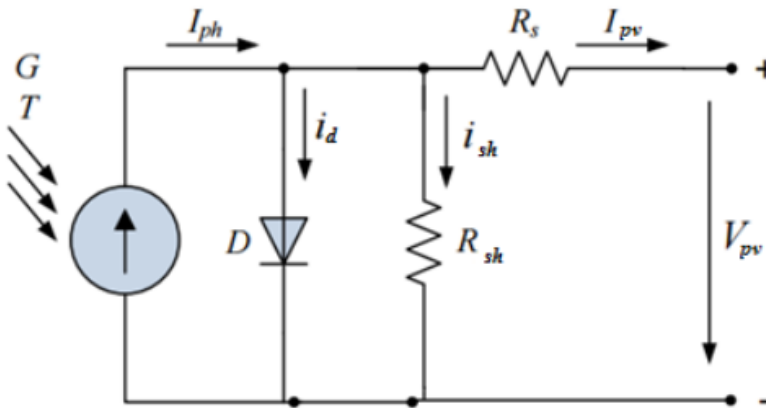


Рис. 4. Эквивалентная схема солнечного элемента, где G – интенсивность падающего света (заданная равной 1000 Вт/м^2)

Моделирование функциональных характеристик проводилось следующим образом: вначале было произведено моделирование по толщине эмиттера при заданном составе и заданной толщине базы Si . После была построена зависимость J_{sc} , U_{oc} , КПД от степени легирования эмиттера и базы при фиксированной толщине эмиттера. На следующем этапе при всех прочих равных данных была построена зависи-

мость КПД от температуры. И на последнем этапе была промоделирована текстурированная поверхность в виде инвертированных пирамид под углом $44,8^\circ$.

Результаты и обсуждение

Толщина кремниевой базы для СЭ была взята равной 350 мкм, что хорошо согласуется с литературными данными [13–16].

В результате расчёта J_{sc} , U_{oc} (рис. 5, а, б) и КПД (рис. 5, в) установлено, что зависимость их от толщины эмиттера имеет близкий к линейному характер, при этом максимальные значения составляют 699,8 мВ, 38,24 мА и 22,31 % при толщине слоя 200 нм.

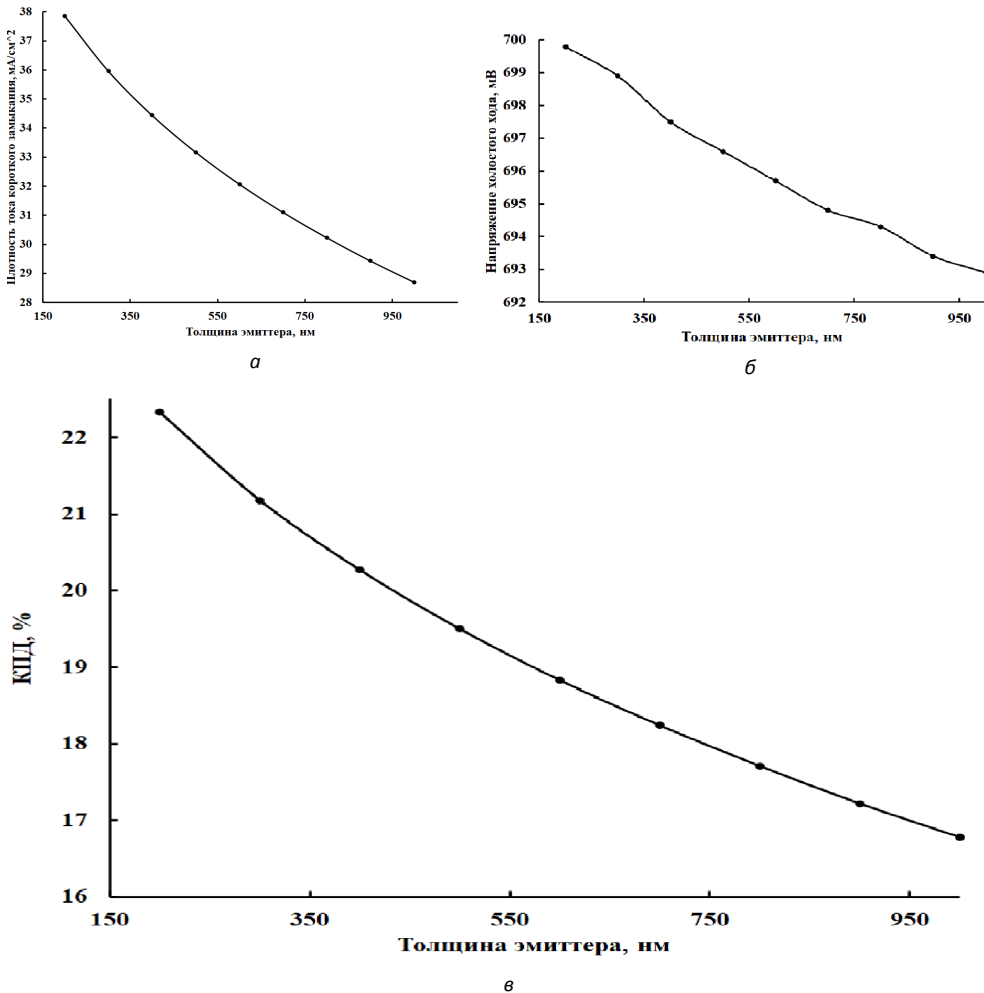


Рис. 5. Зависимость J_{sc} (а), U_{oc} (б) и КПД (в) от толщины эмиттера