

УДК 535.015

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА  
A-Si:H(N)/A-Si:H(I)/C-Si(P)**

Ливинская С.А.

студентка 2 курса магистратуры СКФУ  
г. Ставрополь, РФ

UDC 535.015

**SIMULATION HETEROJUNCTION SOLAR CELL A-Si:H(N)/A-Si:H(I)/C-Si(P)**

Livinskaya S.A.

student of the North Caucasian Federal University  
Stavropol, Russia

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.75.833](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.2.75.833)**АННОТАЦИЯ**

В данной работе был смоделирован кремниевый солнечный элемент *HIT* (*heterojunction with intrinsic thin-layer*) *a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)* с использованием программного обеспечения *AFORS-HET*. Обсуждается влияние толщины слоев и температуры исследуемого солнечного элемента на его фотоэлектрические характеристики. При оптимизации вышеуказанных характеристик его эффективность достигает значения равного 19,1%. Полученные результаты являются заделом для дальнейших научных и технологических исследований по разработке высокоэффективных кремниевых солнечных элементов.

**ANNOTATION**

In this work, a silicon solar cell *HIT* (*heterojunction with intrinsic thin-layer*) *a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)* was simulated using *AFORS-HET* software. The influence of layer thickness and temperature of the solar cell under study on its photovoltaic characteristics is discussed. When optimizing the above characteristics, its effectiveness reaches a value of 19.1%. The results obtained are the foundation for further scientific and technological research on the development of highly efficient silicon solar cells.

**Ключевые слова:** Солнечные элементы, кристаллический кремний, аморфный кремний, гетероструктура, моделирование, *AFORS-HET*.

**Key words:** Solar cells, crystalline silicon, amorphous silicon, heterostructure, modeling, photoelectric characteristics, *AFORS-HET*.

## Актуальность работы

Солнечная энергия является наиболее экологически чистым и экономически эффективным источником энергии среди всех возобновляемых источников и может подходить для замены традиционных видов ископаемого топлива.

Наибольшей эффективностью преобразования солнечного излучения обладают монокристаллические кремниевые солнечные элементы (*c-Si*). Основной их недостаток заключается в значительном расходе высокочистого монокристаллического кремния, большая часть которого выполняет роль пассивной подложки. Для уменьшения себестоимости и увеличения эффективности кремниевых солнечных элементов используются микрокристаллические и аморфные кремниевые слои толщиной до 3 мкм [1, с.2].

Таким образом, моделирование солнечного элемента *HIT a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)* на основе гетероперехода *a-Si(n)/c-Si(p)* является актуальным направлением в солнечной энергетике.

## Цель работы

Цель настоящей работы заключается в моделировании структуры и фотоэлектрических

характеристик СЭ *HIT*-структуры *a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)* (Далее по тексту – СЭ) на основе гетероперехода *a-Si(n)/c-Si(p)* для изучения влияния параметров СЭ на его производительность и определения оптимальных параметров.

## Метод моделирования

В данной работе моделирование СЭ было выполнено с использованием ПО *AFORS-HET*. *AFORS-HET* – это одномерная имитационная программа, которая может обрабатывать произвольный набор различных полупроводниковых слоев. Программное обеспечение решает уравнение Пуассона и уравнения непрерывности, основанные на статистике Максвелла-Больцмана [4, с 2-4].

В процессе моделирования солнечное излучение *AM1,5* было принято в качестве источника освещения с плотностью мощности 100 мВт/см<sup>2</sup>. Передний и задний контакты считаются плоскими, чтобы пренебречь влиянием контактного потенциала. Скорость поверхностной рекомбинации как электронов, так и дырок установлена равной 10<sup>7</sup> см/с.

## Результаты моделирования

Исходные параметры для моделирования СЭ приведены в таблице 1.

Таблица 1

## Исходные параметры для моделирования СЭ

Параметр	<i>a-Si:H(n)</i> [2]	<i>a-Si:H(i)</i> [2]	<i>c-Si(p)</i> [2]
<i>Dielectric constant</i> , [eV] (диэлектрическая постоянная), $E_c$ [эВ]	11.9	11.9	11.9
<i>Electron affinity chi</i> , [eV] (средство электронов), [эВ]	3.9	3.9	4.05
$E_g$ ( <i>bandgap</i> ), [eV] (ширина запрещенной зоны), [эВ]	1.72	1.72	1.124
$E_g$ ( <i>opt. bandgap</i> ), [eV] (оптическая ширина запрещенной зоны), [эВ]	1.72	1.72	1.124
$N_c$ ( <i>effective conduction band density</i> ), [см <sup>-3</sup> ] плотность состояний зоны проводимости, [см <sup>-3</sup> ]	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{20}$	$2.8 \times 10^{19}$
$N_v$ ( <i>effective valence band density</i> ), [см <sup>-3</sup> ] плотность состояний валентной зоны, [см <sup>-3</sup> ]	$1 \times 10^{20}$	$1 \times 10^{20}$	$2.7 \times 10^{19}$
$\mu_n$ ( <i>effective electron mobility</i> ), [см <sup>2</sup> /Vs] (подвижность электронов), [см <sup>2</sup> /Вс]	20	20	1041
$\mu_p$ ( <i>effective hole mobility</i> ), [см <sup>2</sup> /Vs] (подвижность дырок), [см <sup>2</sup> /Вс]	5	5	412.9
$N_a$ ( <i>doping concentration acceptors</i> ), [см <sup>-3</sup> ] (акцепторная примесная концентрация), [см <sup>-3</sup> ]	0	0	$1.5 \times 10^{16}$
$N_d$ ( <i>doping concentration donators</i> ), [см <sup>-3</sup> ] (донорная примесная концентрация), [см <sup>-3</sup> ]	$7.3 \times 10^{19}$	$1 \times 10^3$	0
$v_e$ ( <i>electron thermal velocity</i> ), [см/s] (тепловая скорость электронов), [см/с]	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$
$v_h$ ( <i>hole thermal velocity</i> ), [см/s] (тепловая скорость дырок), [см/с]	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$
$\rho$ ( <i>layer density</i> ), [г см <sup>-3</sup> ] (плотность слоя), [г см <sup>3</sup> ]	2.328	2.328	2.328
$r_{ae}$ ( <i>auger electron recombination coefficient</i> ) [см <sup>6</sup> /s] (коэф. рекомбинации Оже-электронов), [см <sup>6</sup> /с]	0	0	$2.2 \times 10^{-31}$

Рассчитаем эффективность СЭ для двух образцов различных по толщине слоев. Толщины слоев представлены в таблице 2.

Таблица 2

## Толщина слоев СЭ

Слой \ Образец	Толщина слоев СЭ	
	1	2
<i>a-Si:H(n)</i>	100 нм	5 нм
<i>a-Si:H(i)</i>	10 нм	5 нм
<i>c-Si(p)</i>	300 мкм	300 мкм

Полученные ВАХ приведены на рисунке 1. Результаты данного этапа моделирования СЭ представлены в таблице 3.

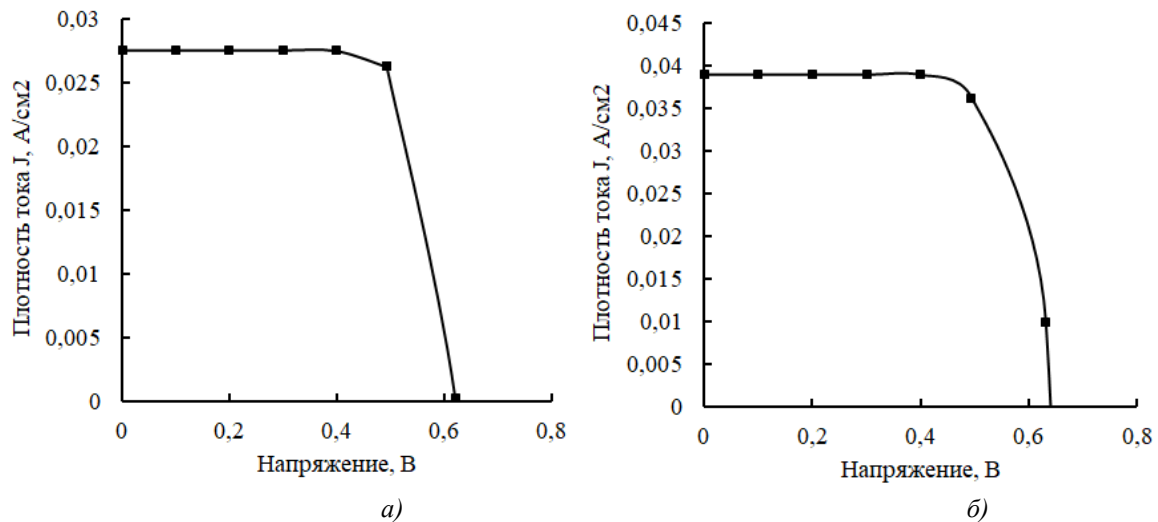


Рисунок 1 – ВАХ СЭ при AM1.5 и различных толщинах слоев: а) образец 1; б) образец 2 (см. таблицу 2)

Таблица 3

Результаты моделирования СЭ

Образец \ Параметр	Напряжение $V_{oc}$ , мВ	Плотность тока $J_{sc}$ , мА/см <sup>2</sup>	Коэффициент заполнения $FF$ , %	КПД $\eta$ , %
1	621,1	27,57	75,66	12,96
2	630,5	37,99	77,48	18,56

Как видно из рисунка 1 и таблицы 3, КПД второго образца имеет более высокое значение эффективности преобразования солнечной энергии чем аналогичная структура с меньшими толщинами слоев. Далее в работе будем говорить о СЭ,

толщина слоев которого соответствует второму образцу из таблицы 2.

В целях достижения большей эффективности СЭ оптимизируем толщину слоев. Влияние толщины внутреннего слоя  $i$ -типа проводимости на характеристики СЭ представлены на рисунке 2.

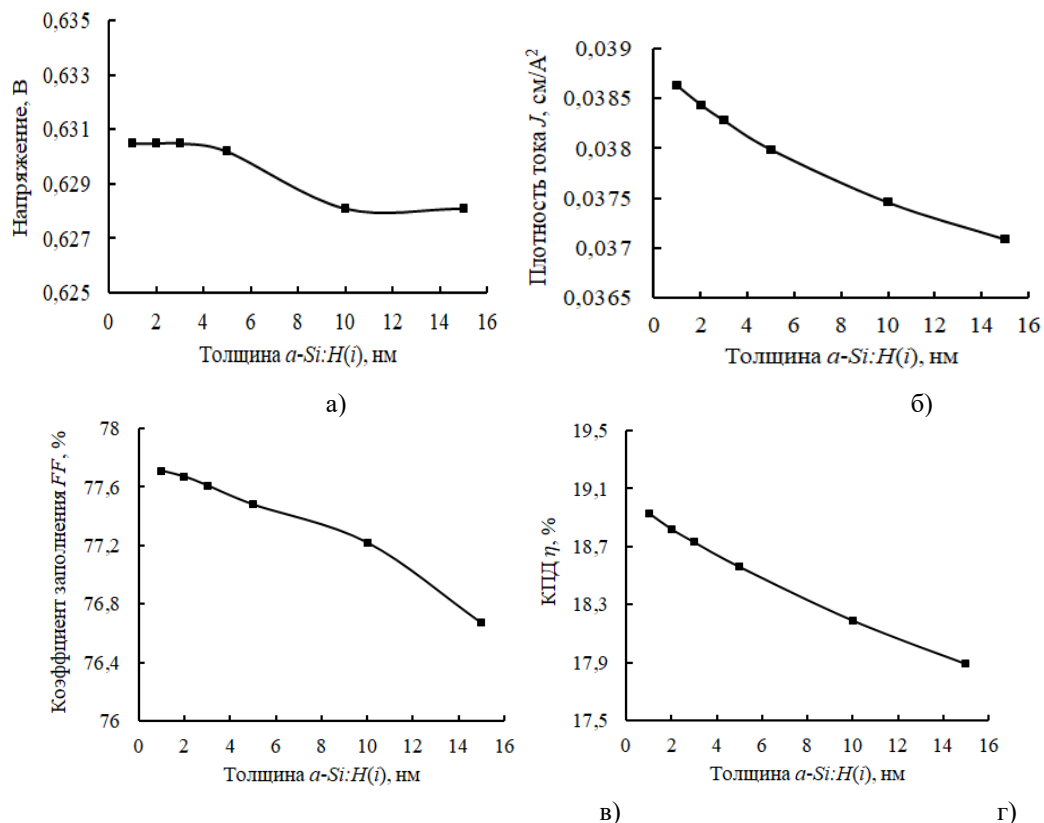


Рисунок 2 – Фотоэлектрические характеристики СЭ в зависимости от толщины слоя  $a\text{-Si:H}(i)$ : а) напряжение; б) плотность тока; в) коэффициент заполнения; г) КПД

Как видно из рисунка 2 максимальная эффективность преобразования СЭ составила 18,93% при встроенном внутреннем слое  $i$ -типа проводимости

1 нм, что на 0,37% выше по сравнению с первоначальным значением КПД СЭ.

С увеличением толщины слоя  $i$ -типа проводимости напряжение разомкнутой цепи остается практически неизменным, а плотность тока короткого замыкания уменьшается, эффективность преобразования снижается. Это объясняется тем, что с увеличением толщины слоя  $i$ -типа проводимости напряженность электрического поля области объемного заряда уменьшается, а поглощение аморфного кремния в коротком спектре увеличивается. Это приводит к тому, что соответствующие светоиндуцированные

носители не могут быть эффективно собраны, соответственно снижается плотность тока короткого замыкания. Отметим, что при достижении толщины внутреннего слоя  $i$ -типа проводимости 5 нм, эффективность преобразования СЭ эквивалентна эффективности СЭ без данного слоя.

Влияние толщины слоя эмиттера  $n$ -проводимости на характеристики СЭ представлены на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, максимальная эффективность преобразования СЭ составила 19,59%, что на 0,66% выше чем КПД, полученный при уменьшении внутреннего слоя  $i$ -типа проводимости до 1 нм и на 1,03% выше чем первоначальное значение КПД моделируемого СЭ.

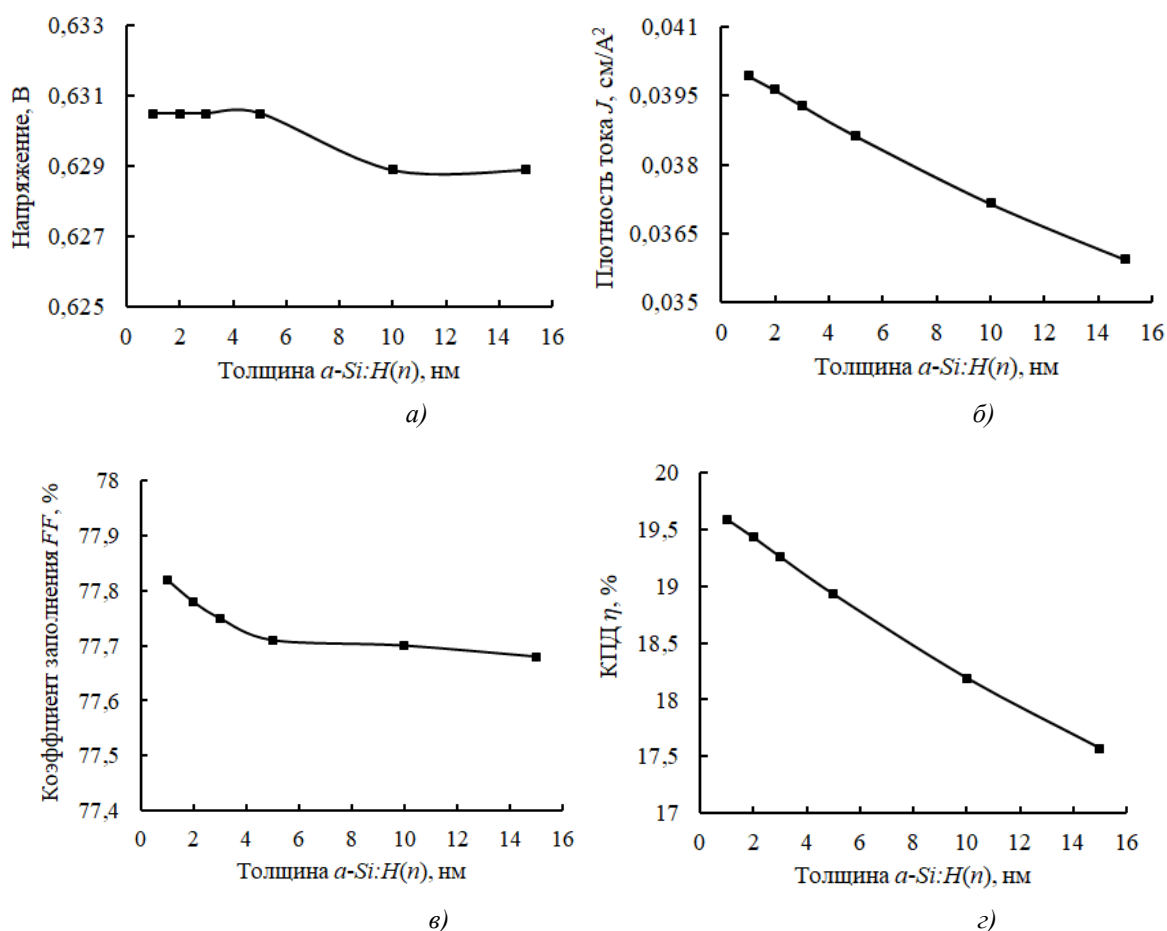


Рисунок 3 – Фотоэлектрические характеристики СЭ в зависимости от толщины слоя эмиттера  $a-Si:H(n)$ : а) напряжение; б) плотность тока; в) коэффициент заполнения; г) КПД

С увеличением толщины эмиттера  $a-Si:H(n)$  напряжение холостого хода мало меняется, а ток короткого замыкания резко уменьшается. Это связано с тем, что с увеличением толщины эмиттера поглощение фотонов в эмиттере увеличивается. Большое количество центров рекомбинации и отсутствие электрического поля в эмиттере приводят к тому, что фотоиндуцированные носители заряда не достигают края области пространственного заряда, соответственно не вносят вклад в световой ток.

Носители заряда в таком случае будут рекомбинированы и исчезнут, что приведет к снижению тока короткого замыкания. Коэффициент заполнения также уменьшается с увеличением толщины  $n$ -области, поскольку при увеличении толщины  $n$ -слоя последовательно увеличивается сопротивление, что снижает коэффициент заполнения [3, с.4].

Влияние слоя подложки  $p$ -проводимости на характеристики СЭ представлено на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4 максимальная эффективность преобразования СЭ составила 19,97%, что на 0,38% выше чем КПД, полученный в предыдущем пункте расчета. Увеличение толщины слоя подложки приводит к увеличению эффективности элемента, что объясняется большей

вероятностью рекомбинации носителей заряда в подложке. Однако при выборе оптимальной толщины подложки необходимо учесть, что стоимость подложки, а соответственно и самого СЭ, также растет с увеличением ее толщины.

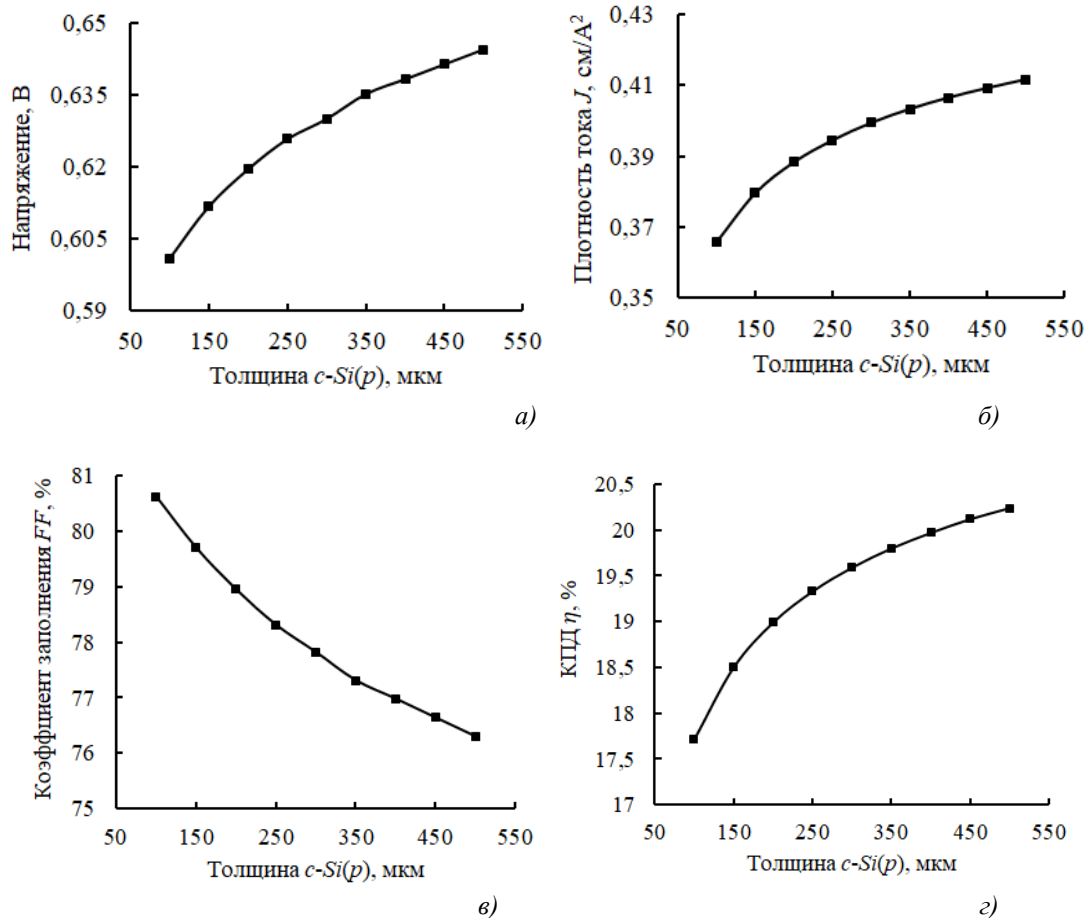
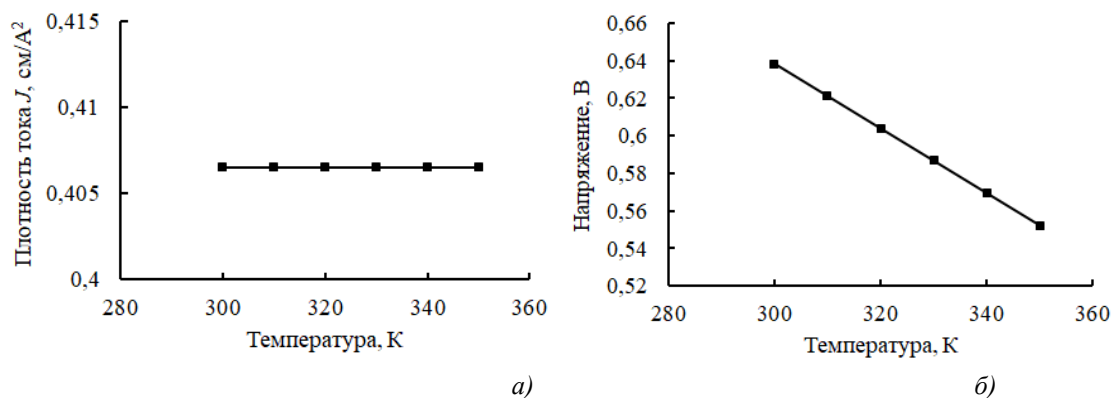


Рисунок 4 – Фотоэлектрические характеристики СЭ в зависимости от толщины слоя подложки  $c\text{-Si}(p)$ : а) напряжение; б) плотность тока; в) коэффициент заполнения; г) КПД

Рассмотрим влияние температуры на эффективность СЭ. Зависимость фотоэлектрических характеристик СЭ от температуры представлены на рисунке 5.



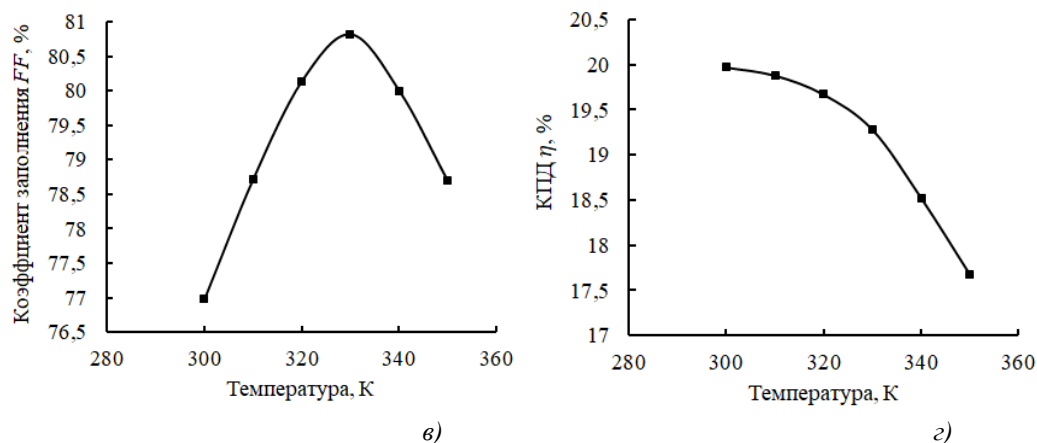


Рисунок 5 – Зависимость фотоэлектрических характеристик СЭ от температуры

Как видно из рисунка 5 при увеличении температуры КПД СЭ уменьшается с уменьшением напряжения холостого хода, что связано с возникновением процесса термализации носителей заряда. Потери на термализацию носителей заряда являются основным ограничением КПД СЭ: при поглощении фотонов с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны элемента, избыточная энергия преобразуется в тепловые колебания решетки. Оптимальная температура СЭ приходится на 300 К.

Таким образом, изменяя толщину слоев гетероструктурного солнечного элемента  $a\text{-Si:H}(n)/a\text{-Si:H}(i)/c\text{-Si}(p)$ , увеличили первоначальное значение КПД для СЭ на 1,41%, что является существенным показателем для солнечных элементов в целом.

#### Заключение

В данной статье солнечный элемент на основе HIT-структуры  $a\text{-Si:H}(n)/a\text{-Si:H}(i)/c\text{-Si}(p)$  был смоделирован с помощью программного обеспечения AFORS-HET. Было обнаружено, что эффективность исследуемого солнечного элемента увеличивается с уменьшением толщин слоя эмиттера  $a\text{-Si:H}(n)$  и внутреннего слоя  $a\text{-Si:H}(i)$ , с увеличением толщины кристаллической подложки  $c\text{-Si}(p)$  и уменьшением температуры элемента.

В данной работе проведен расчет фотоэлектрических характеристик СЭ при толщине слоев СЭ: 1 нм, 1 нм и 400 мкм для эмиттера  $a\text{-Si:H}(n)$ , внутреннего слоя  $a\text{-Si:H}(i)$  и кристаллической подложки  $c\text{-Si}(p)$  соответственно. В таком случае фотоэлектрические характеристики СЭ принимают следующие значения:  $V_{oc} = 638,3$  мВ,  $J_{sc} = 40,65$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 76,98\%$ ,  $\eta = 19,97\%$ .

Проанализировав полученные результаты, учитывая эффективность преобразования и технологические возможности, в качестве оптимальных значений для толщины слоев СЭ были выбраны следующие значения: 3 нм, 3 нм и 300 мкм для эмиттера  $a\text{-Si:H}(n)$ , внутреннего слоя  $a\text{-Si:H}(i)$  и кристаллической подложки  $c\text{-Si}(p)$  соответственно. В этом случае фотоэлектрические параметры HIT-структуры  $a\text{-Si:H}(n)/a\text{-Si:H}(i)/c\text{-Si}(p)$  имеют следующие значения:  $V_{oc} = 630,5$  мВ,  $J_{sc} = 38,92$  мА/см<sup>2</sup>,  $FF = 79,65\%$ ,  $\eta = 19,1\%$ . В данном случае показатель коэффициента заполнения выше, что свидетельствует о более качественной структуре СЭ.

#### Список используемой литературы

1. Моделирование высоковольтных трехпереходных фотопреобразователей на основе аморфного и микрокристаллического кремния/ Чеботарев С.Н. [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. 2012. №5. С.2.
2. Physical properties of Silicon (Si) [Электронный ресурс] URL: <http://www.matprop.ru/Si> (дата обращения: 05.06.2020).
3. Wang Lisheng, Chen Fengxiang and Ai Yu. Simulation of High Efficiency Heterojunction Solar Cells with AFORS-HET // Journal of Physics: Conference Series 276 012177. 2016. P. 4-6.
4. Rolf Stangl and Caspar Leendertz // General Principles of Solar Cell Simulation and Introduction to AFORS-HET: Helmholtz-Zentrum für Materialien und Energie, Institut für Silizium-Photovoltaik, D-12489. Berlin, Germany P.2-4.