

**Чучвага Н.А.^{1,2*}, Аймаганбетов К.П.^{1,2},
Токмолдин Н.С.¹⁻³, Токмолдин С.Ж.¹**

¹Научно-производственный центр агроинженерии, Казахстан, г. Алматы

²Satbayev University, Физико-технический институт, Казахстан, г. Алматы

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: nikolay.chuchvaga@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ ТЕПЛО- И ФОТОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С целью исследования и сравнения физических характеристик высокоэффективных кремниевых солнечных элементов с односторонней и двусторонней генерацией носителей были произведены расчёты распределения температурного поля и распространения света в ячейках, имеющих стандартную архитектуру гетероструктурного кремниевого солнечного элемента на основе перехода «аморфный кремний-кристаллический кремний», также известного как HIT. Было показано, что по сравнению с односторонним солнечным элементом двусторонний элемент менее подвержен нагреванию. При этом, количество света, проникающего в двусторонний солнечный элемент, превышает количество света, проникающего в односторонний элемент, благодаря присутствию альбедо на уровне 17%. В свою очередь, возможность фотоэлектрического преобразования излучения альбедо играет важную роль в повышении суммарной выработки электроэнергии в двусторонних солнечных элементах и демонстрирует их существенное преимущество по отношению к односторонним фотопреобразователям. В программном пакете MATLAB были произведены расчёты распределения температуры и света в двустороннем и одностороннем фотоэлементах, имеющих гетеропереходную кремниевую структуру HIT.

Ключевые слова: фотовольтаика, кристаллический кремний, двусторонний фотоэлемент, математическая физика.

Chuchvaga N.A.^{1,2}, Aimaganbetov K.P.^{1,2},
Tokmoldin N.S.¹⁻³, Tokmoldin S.Zh.¹

¹Scientific production center of agricultural engineering, Kazakhstan, Almaty

²Satbayev University, Institute of Physics and Technology, Kazakhstan, Almaty

³Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Modeling and calculation of thermal and photophysical characteristics of high-performance silicon solar cells

In order to study and compare the physical characteristics of high-performance silicon solar cells with mono- and bifacial generation of carriers, calculations were made of the temperature field distribution and light propagation in cells having a standard architecture of heterostructure silicon solar cell based on the "amorphous silicon-crystalline silicon" junction, also known as HIT. It has been shown that in comparison with a monofacial solar cell, a bifacial cell is less susceptible to heating. At the same time, the amount of light penetrating into the bifacial solar cell exceeds the amount of light penetrating into the monofacial cell, due to the presence of albedo at the level of 17%. The possibility of photovoltaic conversion of albedo radiation plays an important role in increasing the total power generation in bifacial solar cells and demonstrates their significant advantage over monofacial photovoltaic converters. In the MATLAB software package, the temperature and light distributions were calculated in two-sided and one-sided photocells having a HIT heterojunction silicon structure.

Key words: photovoltaics, crystalline silicon, bifacial solar cell, mathematical physics.

Чучвага Н.А.^{1,2}, Аймағанбетов Қ.П.^{1,2},
Тоқмолдин Н.С.¹⁻³, Тоқмолдин С.Ж.¹

¹«Агроинженерия» Ғылыми өндірістік орталығы, Қазақстан, Алматы қ.
²Satbayev University, Физика техникалық институты, Қазақстан, Алматы қ.
³әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
*e-mail: nikolay.chuchvaga@gmail.com

Аса тиімді кремнилі Күн элементтерінің жылулық және фотофизикалық сипаттамаларын модельдеу және есептеу

Бір жақты және екі жақты аса тиімді кремнилі Күн элементтерінің физикалық сипаттамаларын зерттеу және салыстыру мақсатында "аморфты кремний-кристалды кремний" өткелі негізінде гетероқұрылымды кремнилі Күн элементінің стандартты архитектурасы бар, сондай-ақ, НІТ ретінде белгілі ұяшықтарда, температуралық өрістің және жарық сәулесінің таралу қасиеттеріне есептеулер жүргізілді. Зерттеулер жүргізу нәтижесінде бір жақты Күн элементімен екі жақты Күн элементін салыстырып қарағанда, екі жақты Күн элементінің температурасы аз қызғандығы анықталынды. Сонымен қатар, альbedo тұрақтысы 17% – көрсеткішінің болуы арқасында, екі жақты Күн элементінен өтетін жарықтың мөлшері, бір жақты Күн элементінен өтетін жарықтың мөлшерін арттырады. Өз кезегінде, фотоэлектрлік түрлендіруші альbedo сәулелену мүмкіндігі, екі жақты Күн элементтерінің электр энергиясының өндірісін арттыруда маңызды рөл атқарады және олардың бір жақты фототүрлендіргіштерге қатысты көптеген артықшылықтарын көрсетеді. MATLAB бағдарламалық пакетінде НІТ гетероқұрылымды кремний құрылымы бар екі жақты және бір жақты фотокеллерде температура мен жарықтың таралуы есептелген.

Түйін сөздер: фотовольтаика, кристалды кремний, екіжақты фотоэлемент, математикалық физика.

Введение

На сегодняшний день математические методы исследования являются одним из основных инструментов изучения физических явлений и процессов. В частности, методы математической физики широко применяются для моделирования и расчёта физических процессов в полупроводниковых приборах [1-8]. Значительным достижением в солнечной энергетике в последнее время способствовало фундаментальное понимание свойств используемых материалов и возможность тонкой настройки их структуры [9-15]. Одним из методов, который помогает значительно сэкономить время проведения расчётов и исследований, является метод компьютерного моделирования [16-19]. К примеру, ранее было показано, что метод компьютерного моделирования может успешно применяться для исследования выходных характеристик кремниевых фотоэлементов [9]. В упомянутой работе, при помощи метода компьютерного моделирования была оценена перспективность использования двусторонних солнечных модулей в различных ориентационных конфигурациях. Целью настоящей работы является оценка перспективности использования двухсторонних фотоэлементов по сравнению с односторонними с точки зрения

различия в архитектуре данных классов солнечных элементов, которая отражается, в частности, в наличии либо отсутствии сплошного тыльного металлического контакта. Для этого программном пакете MATLAB были произведены расчёты распределения температуры и света в двустороннем и одностороннем фотоэлементах, имеющих гетеропереходную кремниевую структуру НІТ (от английского «heterojunction with intrinsic thin layer»).

Методика эксперимента

Для исследования распределения температуры в одностороннем и двустороннем фотоэлементах были проведены теоретические расчёты при помощи пакета Matlab. В данных расчётах были использованы следующие входные параметры:

- Коэффициент теплопроводности воздуха при 300 К – 0,022 Вт/(м·К);
- Процент света, отражённого от поверхности земли – 17%;
- Теплопроводность кремния при 300 К – 150 Вт/(м·К);
- Коэффициент теплопроводности серебра при 300 К – 430 Вт/(м·К);

– Удельная теплоёмкость кремния – 714 Дж/(кг·К);

– Плотность кремния при нормальных условиях – $2,33 \text{ г/см}^3 = 23300 \text{ кг/м}^3$;

– Температуропроводность кремния при 300К = $89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;

– Толщина кремниевого фотоэлемента = 200 мкм.

Для расчёта задачи распространения тепла в системе для двустороннего фотоэлемента на основе монокристаллического кремния было выбрано эллиптическое уравнение следующего вида:

$$-\text{div}(k \cdot \text{grad}(T)) = Q + h(T_{\text{ext}} - T), \quad (1)$$

где k – коэффициент температуропроводности, Q – количество подаваемого тепла, h – коэффициент конвективной теплопередачи, T_{ext} – температура окружающей среды; T – температура тела. Считаем, что источников тепла в кремнии нет, однако для реального случая, с реальными абсолютными температурами следует провести серию экспериментов по исследованию фоновых возмущений и фоновых фотонных взаимодействий на поверхности кремниевых пластин. Граничные условия со всех сторон двумерной задачи – граничные условия 1-го либо 2-го рода. Теплообмен с внешней средой рассчитывается по закону Фурье.

В качестве первого варианта решения задачи использовались граничные условия Неймана (2-го рода):

$$nk \cdot \text{grad}(T) + q \cdot T = g, \quad (2)$$

где g – плотность теплового потока, q – коэффициент теплопередачи.

Тепловой поток со стороны падения излучения принимался за «1», со стороны торцов – «0», с тыльной стороны – «0,17» с учетом усреднения литературных данных по отражению солнечного излучения от поверхности земли и попаданию его на тыльную поверхность двустороннего солнечного элемента (альбедо).

Распределение температурных изолиний для двустороннего солнечного элемента с учетом приведенных выше условий показано на рисунке 1.

С целью сравнения условий распространения тепла в односторонних и двусторонних солнечных модулях на основе кристаллического

кремния были проведены дополнительные расчеты. Для расчёта задачи распространения тепла в системе для одностороннего модуля было выбрано ранее приведенное эллиптическое уравнение. В системе учтено, что задний тыльный сплошной контакт состоит из серебра. Остальные условия среды аналогичны первому случаю. С тыльной стороны, учитываем отражение непоглощённого излучения от серебряного контакта. Для этого используем закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l},$$

где I_0 – интенсивность входящего пучка, l – толщина слоя вещества, через которое проходит свет, k_λ – показатель поглощения. Считаем, что контакт не имеет теплоотвода, поэтому в модели учитываем теплообмен с воздухом, а не с серебром. При этом, учитываем, что серебро поглощает в диапазоне приблизительно от 300 нм до 500 нм, что составляет около 0,3 от поглощения кремния [20, 22]. Распределение изолиний для одностороннего солнечного элемента показано на рисунке 2.

Из представленных расчётов на основе решения задачи в условиях Неймана видно, что различия в конфигурациях фотоэлектрического генератора имеются лишь в том, что в двустороннем элементе есть больший отток тепла с тыльной стороны. При этом двусторонние солнечные элементы демонстрируют повышенную генерацию электрической энергии, как было показано ранее в работе [9].

Вторым вариантом решения задачи было использование граничных условий Дирихле (1-го рода), то есть с заданной температурой на поверхности. Таким образом, для лицевой стороны элемента:

$$h \cdot T = r, \quad (3)$$

где h – вес, r – температура. Для остальных сторон солнечного элемента используем (2). Считаем, что источников тепла в кремнии нет, как для двустороннего элемента, так и для одностороннего. Алюминиевый задний контакт может поглотить только высокоэнергетичные фотоны, которые поглощаются на поверхности кремния, поэтому контакт не нагревается от солнечных лучей, имеющих длину волны более 1100 мкм, а отражает их [23,24]. Температура

среды равна 20°C . Внешние и граничные условия взяты из статьи [25]. Для температуры внешней среды был выбран месяц март. Среднюю температуру на поверхности фотоэлемента оценили равной 50°C , что соответствует средней температуре поверхности солнечного модуля в марте и сентябре.

Распределение температурных изолиний по толще двустороннего солнечного элемента представлено на Рисунке 3. На Рисунке 4 представлено распределение температурных изолиний по толще одностороннего кремниевого элемента при решении задачи для граничных условий Дирихле.

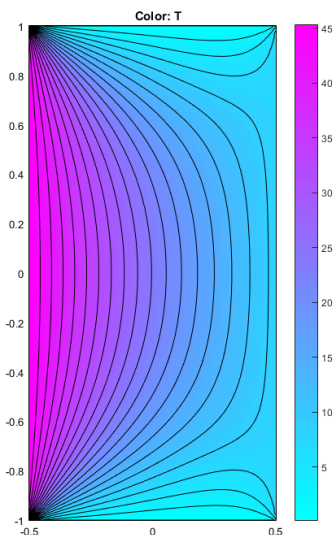


Рисунок 1 – Распределение температурных изолиний по толще двустороннего кремниевого элемента

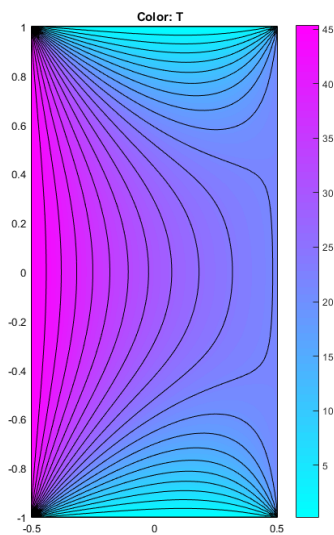


Рисунок 2 – Распределение температурных изолиний по толще одностороннего кремниевого элемента

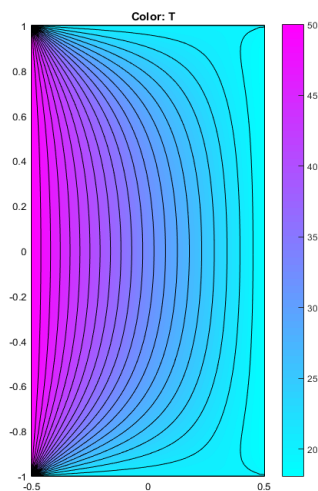


Рисунок 3 – Распределение температурных изолиний по толще двустороннего кремниевого элемента при решении граничных условий Дирихле

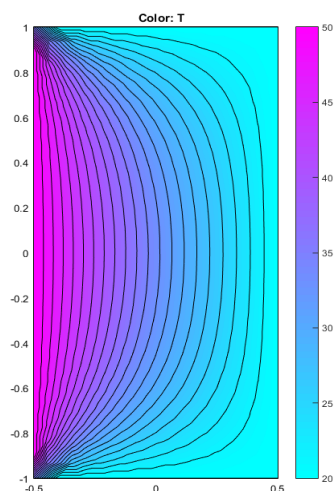


Рисунок 4 – Распределение температурных изолиний по толще одностороннего кремниевого элемента при решении граничных условий Дирихле

Таким образом, рисунки 3 и 4 показывают, что двусторонний солнечный элемент более эффективен при отдаче тепла в окружающую среду, нежели односторонний.

В программе Matlab была решена задача распределения интенсивности света в одностороннем кремниевом фотоэлементе и двухстороннем кремниевом фотоэлементе. В данных расчетах

использовались следующие исходные параметры:

- поглощательная способность для кремния $200 \text{ мкм} = 0,88$;
- a (показатель поглощения) для c-Si (на длине волны 1000 нм) $= 6 \cdot 10^1 \text{ см}^{-1}$;
- a для c-Si (300 нм) $= 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$;
- a для c-Si (400 нм) $= 10^5 \text{ см}^{-1}$;
- a для c-Si (750 нм) $= 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$;
- a для c-Si (600 нм) $= 4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$;
- a для a-Si:H (750 нм) $= 10^2 \text{ см}^{-1}$;
- a для a-Si:H (400 нм) $= 10^6 \text{ см}^{-1}$.

Граничные условия – условия Дирихле. Для задания поглощения света по толщине солнечного элемента использовался Закон Бугера-Ламберта-Бора. Так как интенсивность некогерентного света – величина аддитивная, то на границах интенсивность от разных источников можно суммировать.

С учетом поглощения солнечного света по всей толщине солнечного элемента, при условии высокой длины свободного пробега неосновных носителей заряда, будем рассматривать распределение интенсивности света в моделях двустороннего и одностороннего полупроводникового фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) по всей толщине элементов, а именно – 200 мкм . Так как область объемного заряда (ООЗ), в $p-n$ – переходе, со стороны кристаллического кремния несравнимо больше, чем ООЗ в области аморфного кремния, то в расчётах можно не учитывать

наличие тонкого слоя аморфного кремния в несколько нанометров (для фотоэлементов структуры НІТ со встроенным аморфным слоем).

Для простоты расчётов разделим задачу на три части: посчитаем каждую модель ФЭП в трёх областях длин волн – фиолетовой (300 нм), видимой (оранжевой, 600 нм), и инфракрасной (1000 нм) (рисунок 5).

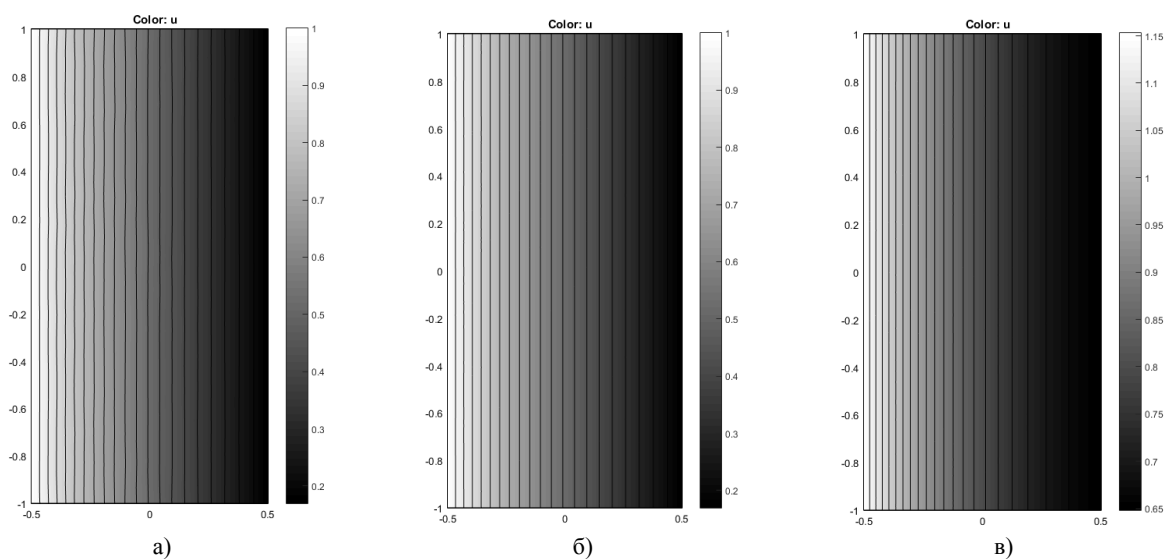
Для расчёта задачи распределения интенсивности света в системе для двустороннего фотоэлемента на основе монокристаллического кремния было выбрано эллиптическое уравнение следующего вида:

$$-\text{div}(\text{grad}(U)) + U = 0,$$

где U – искомая функция.

На границе слева задаём амплитуду волны проникшего внутрь кристалла света. Учитываем свет, который отразился от тыльной стороны и пришёл на фронтальную сторону. Так же учитываем свет, который отразился от поверхности фронтальной стороны и вернулся в кристалл обратно.

Поглощение света в кристалле рассчитывалось по формуле Бугера-Ламберта-Бера. Отражение света на границе раздела сред кремний-воздух и кремний-серебро рассчитывалось при помощи уравнений Френеля и соотношения Снеллиуса. Для двустороннего солнечного элемента аналогичный расчёт производится с поправкой на альбедо в 17% .



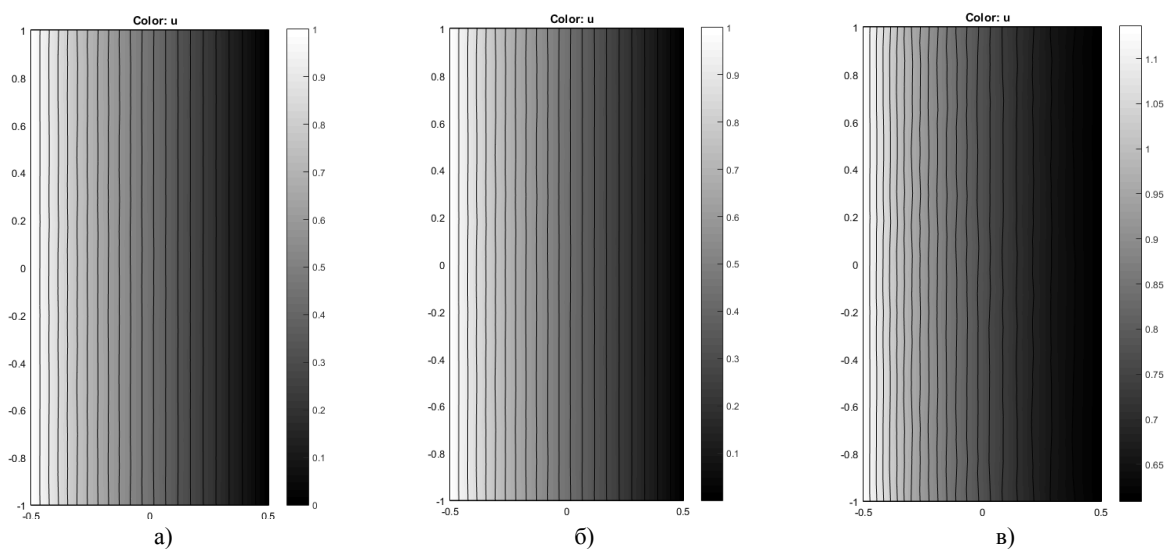
а) при длине волны 300 нм ; б) при длине волны 600 нм ; в) при длине волны 1000 нм

Рисунок 5 – Расчёт распространения света в двустороннем ФЭП

Для решения задачи для одностороннего ФЭП использовались аналогичные условия, за исключением учёта альбеда (рисунок 6).

Как видно из полученных данных (рисунки 5-6), двусторонний элемент засвечивается больше одностороннего, особенно это хорошо видно

в длинноволновом диапазоне. Проведённые расчёты подтверждают обоснованность выбора в пользу двусторонних ФЭП, что актуально при использовании разработанной конфигурации фотоэлектрического генератора.



а) при длине волны 300 нм; б) при длине волны 600 нм; в) при длине волны 1000 нм

Рисунок 6 – Расчёт распространения света в одностороннем ФЭП

Заключение

В программном пакете Matlab были смоделированы и рассчитаны процессы распределения температуры и распределения света в кремниевых фотоэлементах. Результаты расчёта показали, что двусторонний солнечный элемент более эффективен при отдаче тепла в окружающую среду, нежели односторонний. Кроме того, двусторонний элемент в длинноволновом диапазоне спектра засвечивается больше одностороннего. Таким образом, на основе проведенных вычислений, а

также анализа современного уровня фотоэлектрической промышленности, в настоящий момент, наиболее перспективной из кремниевых технологий с точки зрения эффективности преобразования энергии, простоты технологического процесса и выработки электроэнергии в реальных условиях является комбинация гетеропереходных кремниевых солнечных элементов и двусторонних солнечных модулей.

Авторы выражают благодарность Комитету науки МОН РК за финансирование в рамках программы BR05236498.

Литература

- 1 Reed M. et al. Methods of modern mathematical physics. – New York : Academic press, 1972. – Vol. 1.
- 2 Васильева А. Б., Тихонов Н. А. Интегральные уравнения. – СПб.: Лань, 2009.
- 3 Омельченко А. В. Методы интегральных преобразований в задачах математической физики. – М.: МЦНМО, 2010. – 181 с.
- 4 Rota G. C. (ed.). Encyclopedia of Mathematics and its Applications. Addison-Wesley, 1976.

- 5 Crank J., Nicolson P. A Practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type // *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. – Cambridge University Press, 1947. – Vol. 43. – №. 1. – P.50-67
- 6 Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen // *Annalen der physik*. – 1905. – Vol. 322. – №. 8. – P. 549-560.
- 7 Wilmott P. et al. *The mathematics of financial derivatives: a student introduction*. – Cambridge university press, 1995.
- 8 Thambynayagam R.K.M. *The diffusion handbook: applied solutions for engineers*. – McGraw Hill Professional, 2011.
- 9 Tokmoldin N. S., Chuchvaga N. A. et al. The Use of Solar Cells with a Bifacial Contact Grid under the Conditions of Kazakhstan // *Technical Physics*. – 2017. – Vol. 62. – №. 12. – P. 1877-1881.
- 10 Chuchvaga N. A. et al. Study and optimization of heterojunction silicon solar cells // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2018. – Vol. 993. – №. 1. – P.012039.
- 11 Street R. A. *Hydrogenated amorphous silicon*. – Cambridge university press, 2005.
- 12 Swanepoel R. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. – 1983. – Vol. 16. – №. 12. – P.1214.
- 13 Carlson D. E., Wronski C. R. Amorphous silicon solar cell // *Applied Physics Letters*. – 1976. – Vol. 28. – №. 11. – P.671-673.
- 14 Spear W. E., Le Comber P. G. Substitutional doping of amorphous silicon // *Solid state communications*. – 1975. – Vol. 17. – №. 9. – P. 1193-1196.
- 15 Brodsky M. H., Cardona M., Cuomo J. J. Infrared and Raman spectra of the silicon-hydrogen bonds in amorphous silicon prepared by glow discharge and sputtering // *Physical Review B*. – 1977. – Vol. 16. – №. 8. – P. 3556.
- 16 Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in Matlab // *2004 IEEE international conference on robotics and automation (IEEE Cat. No. 04CH37508)*. – IEEE, 2004. – P. 284-289.
- 17 Lofberg J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB // *Proceedings of the CACSD Conference*. – 2004. – Vol. 3.
- 18 Stangl R., Kriegel M., Schmidt M. AFORS-HET, Version 2.2, a numerical computer program for simulation of heterojunction solar cells and measurements // *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference. IEEE*. – 2006. – Vol. 2. – P. 1350-1353.
- 19 Кирьянова Д.А., Бондаренко А.К., Афонина К.Н. Анализ спектров поглощения гибридных нанокompозитных материалов на основе наночастиц серебра в матрице поливинилового спирта // *Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: сб. ст. по мат. XXXIII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 7(32)*. URL: [http://sibac.info/archive/nature/7\(32\).pdf](http://sibac.info/archive/nature/7(32).pdf) (дата обращения: 18.04.2019)
- 20 Kreibitz U., Genzel L. Optical absorption of small metallic particles // *Surface Science*. – 1985. – Vol. 156. – P.678-700.
- 21 Doremus R. H. Optical properties of small silver particles // *The Journal of Chemical Physics*. – 1965. – Vol. 42. – №. 1. – P.414-417.
- 22 Ehrenreich H., Philipp H. R., Segall B. Optical properties of aluminum // *Physical Review*. – 1963. – Vol. 132. – №. 5. – P.1918.
- 23 Arakawa E. T., Williams M. W. Optical properties of aluminum oxide in the vacuum ultraviolet // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1968. – Vol. 29. – №. 5. – P.735-744.
- 24 Джумаев А. Я. Анализ влияния температуры на рабочий режим фотоэлектрической солнечной станции // *Технические науки – от теории к практике*. – 2015. – №. 46. – С. 33-40.

References

- 1 M. Reed, *Methods of modern mathematical physics*, (New York : Academic press, 1972), vol.1.
- 2 A.B. Vasileva, N.A. Tikhonov, *Integralnye uravneniya*, (Sankt-Peterburg: Lan', 2009). (in Russ).
- 3 A.V. Omelchenko, *Metody integralnyh preobrazovaniy v zadchah matematicheskoy fiziki*, (Moscow, MCNMO, 2010), 181 p. (in Russ).
- 4 G.C. Rota (ed.), *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*, (Addison-Wesley, 1976).
- 5 J. Crank, P. A. Nicolson, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Cambridge University Press, 43 (1), 50-67 (1947).
- 6 A. Einstein, *Annalen der physik*, 322 (8), 549-560 (1905).
- 7 P. Wilmott, *The mathematics of financial derivatives: a student introduction*, (Cambridge university press, 1995).
- 8 R.K.M. Thambynayagam, *The diffusion handbook: applied solutions for engineers*, (McGraw Hill Professional, 2011).
- 9 N.S. Tokmoldin, N.A. Chuchvaga, *Technical Physics*, 62 (12), 1877-1881 (2017).
- 10 N.A. Chuchvaga, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 993 (1), 012039 (2018).
- 11 R.A. Street *Hydrogenated amorphous silicon*, (Cambridge university press, 2005).
- 12 R. Swanepoel, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 16 (12), 1214 (1983).
- 13 D.E. Carlson, C.R. Wronski, *Applied Physics Letters*, 28 (11), 671-673 (1976).

- 14 W.E. Spear, P.G. Le Comber, *Solid state communications*, 17 (9), 1193-1196 (1975).
- 15 M.H. Brodsky, M. Cardona, J.J. Cuomo, *Physical Review*, 16 (8), 3556 (1977).
- 16 J. Lofberg, IEEE international conference on robotics and automation (IEEE Cat. No. 04CH37508), 284-289 (2004).
- 17 J. Löfberg, YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB, Proceedings of the CACSD Conference, 3 (2004).
- 18 R. Stangl, M. Kriegel, M. Schmidt, 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, IEEE, 2, 1350-1353 (2006).
- 19 D.A. Kiryanova, A.K. Bondarenko, and K.N. Afonina, Analiz spectr poglasheniya gibridnykh nanokompozitnykh materialov na osnove nanochastic serebra v matrice polivinilovogo spirta, Nauchnoe soobshchestva studentov XXI stoletiya, *Estestvennye nauki*, 7(32). URL: [http://sibac.info/archive/nature/7\(32\).pdf](http://sibac.info/archive/nature/7(32).pdf) (data obrasheniya: 18.04.2019). (in Russ).
- 20 U. Kreibig, L. Genzel, *Surface Science*, 156, 678-700 (1985).
- 21 R.H. Doremus, *The Journal of Chemical Physics*, 42 (1), 414-417 (1965).
- 22 H. Ehrenreich, H. R. Philipp, B. Segall, *Physical Review*, 132 (5), 1918 (1963).
- 23 E.T. Arakawa, M.W. Williams, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 29 (5), 735-744 (1968).
- 24 A.Ya. Dzhumaev, Analiz vliyaniya temperatury na rabochiy rezhim photoelektricheskoi solnechnoi stancii, *Tekhnicheskie nauki ot teorii k praktike*, 46, 33-40 (2015). (in Russ).