

**Аймағанбетов К.П., Чучвага Н.А., Жантуаров С.Р.,  
Шонғалова А.К.\* , Тоқмолдин Н.С.**

ЖШС «Физика техникалық институты», Сәтбаев Университеті,  
Қазақстан, Алматы қ., \*e-mail: a.k\_012@mail.ru

## **ГЕТЕРОӨТКЕЛДІ КРЕМНИЙЛІ КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ БАҒА ФАКТОРЛАРЫ МЕН ОПЕРАЦИОНДЫҚ ШЫҒЫС СИПАТТАМАСЫНЫҢ ӨТЕЛУ МЕРЗІМІНЕ БАЙЛАНЫСТЫ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ**

Бұл мақалада қазіргі уақыттағы шығыс сипаттамалары рекордтық көрсеткішке ие кремний негізіндегі, күшейткішсіз күн элементтері – HIT құрылымды фотоэлементінің модельдеу нәтижелері көрсетілді. Фотоэлектрлі түрлендіргіштер үшін қолданылатын кремнийлі төсеніштерге, нарықтық экономикалық тұрғыдан сараптамалар жүргізілді. Сараптама нәтижесінде таңдап алынған марканың  $n$  – типті өткізгіштікке ие кремнийлі пластиналардың қалыңдығына байланысты күн элементінің жұмыс істеу тиімділігі мен сапа құнының арасындағы өзара корреляциясы зерттеліп, күн элементтерін сандық үлгілеуге арналған Afors-het бағдарламасында оңтайландыру жүргізілді. Сонымен қатар, болашақта пайдаланылатын кремний пластинасының әр түрлі диапазондық қалыңдығы бойынша жүргізілген сараптамалауда, күн элементтерінің өтелу мерзімі анықталынды. Күн элементінің өтелу мерзімі фотоэлектрлі түрлендіргіштерді құрайтын материалдардың нарықтағы сапа құнымен, оның операционды шығыс сипаттамаларының өзара байланыстылығымен анықталатындығы көрсетілді.

**Түйін сөздер:** HIT, фотоэлектрлі түрлендіргіш (ФЭТ), Afors-het.

Aimaganbetov K.P., Chuchvaga N.A., Zhantuarov S.R.,  
Shongalova A.K.\* , Tokmoldin N.S.

«Institute of Physics and Technology» LLP, Satbayev University,  
Kazakhstan, Almaty, \*e-mail: a.k\_012@mail.ru

### **Study of the influence of pricing factors and output characteristics of heterojunction silicon solar cells on their operating payback period**

This paper presents the results of computer simulation of a solar cell featuring the HIT structure, currently demonstrating record power conversion efficiencies for concentrator-free silicon-based cells. Further, the market analysis for silicon wafers used for solar cell manufacturing is performed. Based on this analysis, the efficiency correlation and the quality of the solar cell were studied depending on the thickness of the  $n$ -type single-crystal silicon wafer. The optimization was carried out on the Afors-het program, designed for numerical modeling of solar cells. On the basis of the analysis, the recoupment of solar cells for silicon substrates of various thickness was calculated for their subsequent operation. It is shown that the solar cell payback is determined by the correlation between pricing parameters of materials used in photovoltaic converter, as well as its output operating characteristics.

**Key words:** HIT, photovoltaic converter, Afors-het.

Аймаганбетов К.П., Чучвага Н.А., Жантуаров С.Р.,  
\*Шонгалова А.К., Токмолдин Н.С.

ТОО «Физико-технический институт», Satbayev University,  
Казахстан, г. Алматы, \*e-mail: a.k\_012@mail.ru

**Исследование влияния ценовых факторов и  
выходных характеристик гетеропереходных  
кремниевых солнечных элементов на их операционную окупаемость**

В данной работе представлены результаты моделирования солнечного элемента со структурой НІТ, в настоящее время демонстрирующей рекордные показатели КПД для безконцентраторных элементов на основе кремния. Произведён анализ рынка сбыта кремниевых подложек, используемых для производства фотоэлектрических преобразователей. В результате анализа были изучены корреляция эффективности и качество солнечного элемента в зависимости от толщины пластины монокристаллического кремния n-типа проводимости. Произведена оптимизация на программе Afors-het, предназначенной для численного моделирования солнечных элементов. На основании проведенного анализа была рассчитана окупаемость солнечных элементов для кремниевых подложек различной толщины при их последующей эксплуатации. Показано, что окупаемость солнечных элементов определяется корреляцией между ценовыми параметрами материалов, из которых состоит фотоэлектрический преобразователь, а также его выходными операционными характеристиками.

**Ключевые слова:** НІТ, фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), Afors-het.

## Кіріспе

Электр энергиясын үнемдеудің жаңа бағыттарының бірі «жаңартылмалы энергия көздері» болып табылады. Айта кетелік, елімізде күн энергиясын қолдануға үлкен көңіл бөлінуде және электр энергиясын дамытудағы перспективті жобалардың бірі – жаңартылмалы энергия көздері болып саналады. Күн инсоляциясының деңгейі Қазақстан Республикасының барлық аумағында өте жоғары болғандықтан, күн энергиясын пайдалану өте тиімді болып табылады [1-2]. Қазақстан Республикасы Еуразиялық Экономикалық Кеңестің мүшесі ретінде және күн ресурстарымен кремний шикізаттарына бай болып саналатын мемлекеттердің қатырына жатады. Күн станциялары экологиялық таза, дыбыссыз жұмыс істейді және ол қоршаған ортаға мүлдем зиянсыз. Фотоэлектрлі модульдердің негізгі артықшылықтары, қызмет көрсетудің қарапайымдылығы болып табылады. Елімізде күн элементтерін өндіру – бұл тек қана серпінді, экологиялық таза жоба ғана емес, сонымен қатар елдіміздегі негізгі шараларды көздеген өндірістік желі болып табылады. Қазақстанда күн панельдерін шығаратын өз зауыты пайда болатыны туралы 2010 жылы, ЕХРО-2017 көрмесін өткізетін елді таңдаған Парижде нәтижелерін жариялаудан көп бұрын белгілі болды [3]. Ел басы Нұрсұлтан Назарбаевтың белгілеген «Болашақтың энергиясына» бағдары елімізде қалпына келтірілетін энергия көздері бағытында іске асырылатын жобаларға назарды бірден

аударды. Бүгінгі күні ұлттық экономиканың құрылымын түбегейлі өзгертуі тиіс көптеген бастамалар әзірленіп, іске асырылуда. 2012 жылғы желтоқсан айында ғана ашылған, бірақ «күн» өнімін сатумен белсенді түрде айналысып жатқан «Astana Solar» ЖШС фотоэлектрлі модульдердің зауыты жаңа қазақстандық келешекке өзінің үлесін қосып келеді [4].

Диффузиялы технологиялық әдіспен алынатын дәстүрлі кристалдық күн элементтерінің артықшылықтары: аса тиімді түрде күн энергиясын электр энергиясына түрлендіреді. Сонымен бірге, кемшілігін айтар болсақ, ПӘК-і үлкен көрсеткішті болатын, өте таза кристаллды кремнийді алу үшін, 1000°C дейінгі жоғарғы температурада қыздыру тиімсіз болып саналады. Күн элементтерін, бұл әдіспен жасап шығару құны, жоғары болып есептеледі. Амorfты кремний күн энергетикасы үшін альтернативті дәстүрлі технология болып саналады, алайда лабораториялық күн элементтерінің ПӘК-і 13,4%-ды ғана көрсетеді [5-10]. Амorfты және кристаллды кремнийдің тыйым салу аймағына байланысты өзіндік оптоэлектрлі қасиетімен ерекшеленеді. Кеңаймақты амorfты кремнийдің оптикалық жарықты жұту коэффициенті ( $E_g = 1,9$  эВ салыстырғанда  $E_g = 1,12$  эВ) көрінетін спектр аймағында өте жоғары. Екі материалды пайдалану арқылы 200-250°C температурада кремнийді аз қамтамасыз ететін, ПӘК-і 20%-дан жоғары, жұмыс тиімділігі жақсартылған НІТ (heterojunction technology) атауымен белгілі, гетерооткелді күн элементін

алуға болады [11-18]. Жұқа пластиналарды пайдаланған жағдайда, жұмыс тиімділігін сақтай отырып өзіндік құнын азайту мақсатында қолдану жайлы қызығушылықтар туындайды. Оларға дәлел келтіретін болсақ, Sanyo компаниясында, қалыңдығы 98 мкм және ауданы 100,3 см<sup>2</sup> болатын кремнийлі пластиналарды қолдану арқылы 22,8% ПӘК-і көрсеткішті көрсететін күн элементі жасалынды. Экономикалық бағасына сүйенетін болсақ, кремнийлі пластиналардың құны, күн элементінің 30-60%-ға жуық өзіндік құнын құрайды [19].

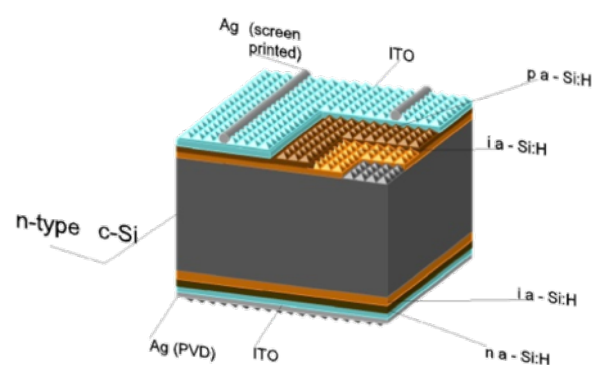
### Зерттеу бөлімі

Кремнийлі пластиналардың қалыңдығына байланысты күн элементінің жұмыс тиімділігі мен сапа құнының арасындағы өзара корреляциясын зерттейтін болсақ, алынған нәтижелер, электр энергиясына сай, гетерооткелді кремнийлі күн элементін жасау кезіндегі жақсартылған үйлесімді параметрлерді көрсетеді. Осы мақаланың негізгі мақсаты – өзара корреляцияны зерттеу болып табылады. Гетерооткелді күн элементін жасау барысында, сапасы және бағасы тиімді монокристалды кремнийлі пластиналарды қажет етеді. Соған байланысты, гетерооткелді кремнийлі күн элементін жасауда қолданылатын нарықтық материалдар жайлы мәліметтерге шолулар жүргізілді. Нарықтық материалдарды зерттеу нәтижесінде, ауданы 191,04 см<sup>2</sup> болатын Pluto New Technology Co.,Ltd. Guangdong, China маркалы [20], өткізгіштігі n/p типті, монокристалды кремний пластинасы жайлы пайдалы ақпараттар мен баға ұсынымдары таңдап алынды.

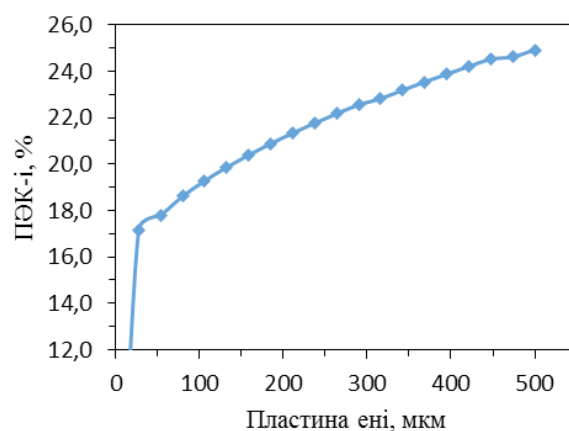
Күн элементінің электрлі физикалық сипаттамаларын зерттеуге арналған арнайы Afors-het бағдарламасының көмегімен, фотоэлектрлі түрлендіргіштің (ФЭТ) моделі жасалынды (1-сурет).

Зерттеулер жүргізу барысында жасалынған ФЭТ-тің моделіне «қалыңдығы және сапасы» туралы сипаттамасына анализдер жүргізу үшін, монокристалды кремний пластинасының физикалық сипаттамаларын пайдалана отырып, арнайы бағдарламаның көмегімен, пластинаның әр-түрлі диапазондық тиімді қалыңдығы бойынша ФЭТ-тің ПӘК-і анықталды (2-сурет).

Жоғарыда көрсетілген, жұмыс тиімділігі жоғары болып саналатын кремний пластиналарын қолдану арқылы күн элементінің моделін жасайтын болсақ, күн энергиясынан алынатын физикалық параметрлерді келесі түрде қарастыруға болады.



1-сурет – «HIT» – гетерооткелді кремнийлі күн элементінің құрылымдық сұлбасы



2-сурет – Пластинасының диапазондық тиімді қалыңдығы бойынша модельденген ФЭТ-тің ПӘК-і графигі

Бір шаршы метр жерге стандартты жүйе бойынша 1000 Вт/м<sup>2</sup> күн энергиясы түседі. Біздің пластинамыздың ауданы 0,019104 м<sup>2</sup>, және бұл пластинаға 19,104 Вт\*сағ күн энергиясы келіп түседі. Диапазондық қалыңдығы әр түрлі кремний пластинасын қолдана отырып, арнайы бағдарламаның көмегімен модельдеу кезінде ФЭТ-тің ПӘК-і анықталынды. ФЭТ-тің қуаты, пластинаға түсетін күн энергиясының қуатымен модельденген күн элементінің ПӘК-ін көбейту арқылы алынады. Қазақстан Республикасының барлық аймағында күн инсоляциясы жоғары болғандықтан, модельденген ФЭТ-тің орташа жұмыс істеу уақыты, тәулігіне 7 сағат деп алынды. Өндірілетін энергияның көлемін есептеу үшін келесі формуланың (1) көмегімен анықтауға болады:

$$E_{\text{ФЭТ}} = \frac{E_{\text{инс}} \times P_{\text{КЭ}}}{P_{\text{инс}} * k}, \quad (1)$$

мұндағы,  $E_{инс}$  – орташа айлық инсоляциясы,  $P_{кз}$  – күн элементінің қуаты,  $P_{инс}$  – 1 шаршы метр жерге түсетін қуат инсоляциясы,  $k$  – шығын коэффициенті (1,2-1,4).

Зерттеулер барысында негізгі қойылатын талаптардың бірі, жасалынған жұмыстың өтелу мерзімі болып табылады. Өтелу мерзімі келесі формуламен анықталады:

$$E_{\theta\theta} = \frac{E_{инс} \times P_{кз}}{P_{инс} * k}, \quad (2)$$

мұндағы,  $A_{пк}$  – пластина құны,  $V_{гк}$  – бір жылда үнемделген қаржы.

Бір жылда үнемделінетін қаржыны анықтау үшін келесі формуланы пайдаланамыз:

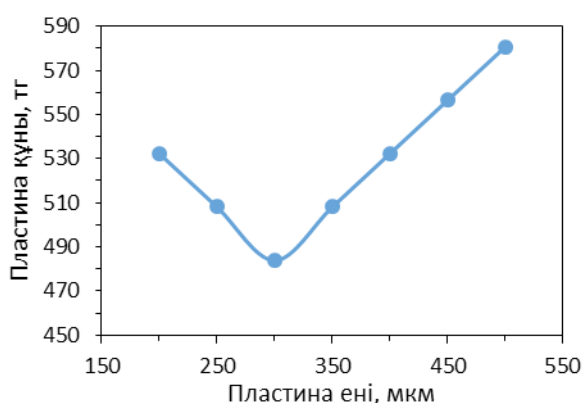
$$V_{гк} = C_{\text{ЭЭК}} * P_{\text{ЭК}} \quad (3)$$

мұндағы,  $C_{\text{ЭЭК}}$  – электр энергиясының құны,  $P_{\text{ЭК}}$  – бір жылда өндірілетін қуат. Алынған нәтижелер төмендегі 1-кестеде көрсетілген.

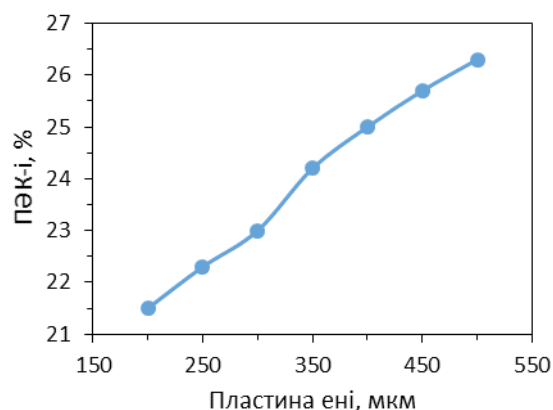
Алынған нәтижелерге сүйене отырып, қажетті монокристалды кремний пластинасының өзіндік сапа құнына байланысты ПЭК-і мен оның қалыңдығының арасындағы ерекшелікті салыстырамыз (3-сурет). Бұл әдіс, «қалыңдығы және сапасы» жайлы сипаттамасын тиімді жақсартуға мүмкіндік береді.

1-кесте – Модельденген ФЭТ-тің қалыңдығы бойынша физикалық сипаттамалары

Ені, мкм	200	250	300	350	400	450	500
Пластина аумағы, см <sup>2</sup>	191,04						
Пластина бағасы, тг	532,26	508,06	483,87	508,06	532,26	556,45	580,65
Қуаты, Вт	4,11	4,26	4,40	4,62	4,77	4,91	5,02
Модульдегі элементтің құнының үлесі, %	30%						
Электр энергиясының құны: кВт*ч, тг	17						
Бір жылда сағат саны, сағ.	2190	2190	2190	2190	2190	2190	2190
Бір жылда өндірілетін қуат, кВт*ч	8,99	9,32	9,62	10,12	10,45	10,75	11,00
Бір жылда үнемделген қаржы саны, тг	152,91	158,60	163,58	172,11	177,80	182,78	187,05
Өтелу мерзімі, жыл	3,53	3,25	3,00	2,99	3,04	3,09	3,15



а)



б)

3-сурет – Кремний пластинасының өзіндік құнына байланысты: а) ПЭК-і және б) оның қалыңдығы бойынша графигі

Көрсетілген графиктер мен кестелерді қарайтын болсақ, нарықтағы қажетті пластиналардың қалыңдығына байланысты өзіндік құнымен жұмыс тиімділігі жақсартылған баға ұсынымын көруге болады. Осыған орай, көрсетілген кестедегі алынған нәтижелерге талдау жасайтын болсақ, қалыңдығы 300 және 350 мкм болатын кремний пластиналарының өзіндік құны мен ПӘК-і өте тиімді болып отыр және басқа кремнийлі пластиналардың физикалық сипаттамаларымен салыстырғанда, бірнеше есе арзан және жұмыс тиімділігі өте жоғары болып отыр. Жоғарыда айтылғандай, негізгі қойылған мақсатқа қол жеткізу үшін, қажетті пластинаның өзіндік құнымен оның жұмыс тиімділігін арасындағы корреляцияны анықтау болатын. Қойылған талаптарға сай, қалыңдығы 300 және 350 мкм болатын кремний пластиналарының жұмыстың өтелуі мерзімі үлкен көрсеткішті көрсетеді. Әрине, бұл көрсеткіштер теориялық түрде зерттелінді. Алайда, әр түрлі сыртқы факторлардың әсерінен, теориялық түрде алынған ФЭТ-тің физикалық параметрлері өзгеруі мүмкін. Себебі, ауа-райы немесе күн инсоляциясы құбылмалы болып келетіндіктен, нақты физикалық параметрлерді алу өте күрделі. Кейбір деректерде, күн модулінің жұмыс тиімділігі 2%-ға төмендеуі мүмкін дейтін болжамдар бар.

## Қорытынды

Зерттеу барысында алынған нәтижелерді қортындылайтын болсақ, күн элементінің өтелу мерзіміне, ФЭТ-дің тиімді ПӘК-і ғана емес, сондай-ақ экономикалық тұрғыдан әсер етеді. Соған байланысты, негізгі жұмыста күн элементтері үшін өте тиімді монокристалды кремний пластинасы таңдап алынды. Себебі, монокристалды кремний пластинасының сапасы, ФЭТ – тің шығыс сипаттамаларына үлкен әсер етеді. Монокристалды кремний пластинасының диапазондық қалыңдығына байланысты талдаулар жасай отырып, жұмыстың өтелу мерзімі анықталды. Нәтижесінде, қалыңдығы 300 және 350 мкм болатын монокристалды кремний пластинасының шығыс сипаттамалары және жұмыстың өтелу мерзімі жоғарғы көрсеткішті көрсетті. Әрине, негізгі жұмысты толығымен орындау үшін, ФЭТ – тің контактілерін орнатуға арналған металды пастасын және сонымен қатар, модельдерді құрастыруға арналғын ламинат секілді т.б. қажетті материалдар нарықтық тұрғыдан зерттеулер жүргізуді талап етеді.

*Алғыс білдіру. Мақаланың авторлары, ҚР БҒМ ғылым комитетіне 2840/ГФ-15-ОТ гранттық жоба аясында берілген қаржыландыру үшін алғысын білдіреді.*

## Әдебиеттер

- 1 Kryuchenko Y. V., Sachenko A. V., Bobyl A. V., Kostilyov V. P., Sokolovskyi I. O., Terukov E. I., Tokmoldin N., Tokmoldin S.Z., Smirnov A. V. Evaluation of the annual electric energy output of an a-Si:H solar cell in various regions of the CIS countries // Energy Policy. – 2014. – Т. 68. – С. 116-122.
- 2 Surface meteorology and Solar Energy – NASA [электрондық ақпараттық ресурс] (қолдану мерзімі: 02.10.2017). – 2017.- базаға қол жеткізу режимі: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- 3 Akorda.kz [электрондық ақпараттық ресурс] (қолдану мерзімі: 03.10.2017).- базаға қол жеткізу режимі: [http://www.akorda.kz/ru/national\\_projects/expo-2017-v-astana](http://www.akorda.kz/ru/national_projects/expo-2017-v-astana)
- 4 Astana Solar [электрондық ақпараттық ресурс] (қолдану мерзімі: 03.10.2017). – базаға қол жеткізу режимі: <http://astanasolar.kz/kk/news/kazakstanda-kun-energetikasynyn-damuy-shyndyk-zhne-perspektivalar>
- 5 Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 41) // Progress in Photovoltaics. – 2013. – Т. 21, № 1. – С. 1-11.
- 6 Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 42) // Progress in Photovoltaics. – 2013. – Т. 21, № 5. – С. 827-837.
- 7 Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D. Solar cell efficiency tables (version 43) // Progress in Photovoltaics. – 2014. – Т. 22, № 1. – С. 1-9.
- 8 Maehlum M. A. Energy Informative The Homeowner’s Guide To Solar Panels, Best Thin Film Solar Panels—Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS //Last updated. – 2015. – Т. 6.
- 9 Ghahremani A., Fathy A. E. High efficiency thin-film amorphous silicon solar cells //Energy Science & Engineering. – 2016. – Т. 4. – №. 5. – С. 334-343.
- 10 Technology and Applications of Amorphous Silicon. Springer Series in Materials Science. / Street R.: Springer, 2000. Springer Series in Materials Science. – 417 с.
- 11 Tanaka M., Taguchi M., Matsuyama T., Sawada T., Tsuda S., Nakano S., Hanafusa H., Kuwano Y. Development of new a-si c-si hetero-junction solar-cells – acj-hit (artificially constructed junction-heterojunction with intrinsic thin-layer) // Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers. – 1992. – Т. 31, № 11. – С. 3518-3522.



- 12 Tanaka M., Okamoto S., Tsuge S., Kiyama S. Development of hit solar cells with more than 21% conversion efficiency and commercialization of highest performance hit modules // Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Vols a-C. – 2003. – C. 955-958.
- 13 Tsunomura Y., Yoshimine Y., Taguchi M., Baba T., Kinoshita T., Kanno H., Sakata H., Maruyama E., Tanaka M. Twenty-two percent efficiency HIT solar cell // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2009. – Т. 93, № 6-7. – С. 670-673.
- 14 Santbergen R., Liang R., Zeman M. A-Si: H solar cells with embedded silver nanoparticles // Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2010 35th IEEE. – IEEE, 2010. – C. 000748-000753.
- 15 Terakawa A. et al. Sanyo's R&D on thin-film silicon solar cells // Proc. of the 26th EUPVSEC. – 2011. – C. 2362-2365.
- 16 Aya Y. et al. Progress of Thin-Film Silicon Photovoltaic Technologies in SANYO // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. – 2012. – Т. 20. – №. 2. – С. 166-172.
- 17 Masuko K. et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell // IEEE Journal of Photovoltaics. – 2014. – Т. 4. – №. 6. – С. 1433-1435.
- 18 Yoshikawa K. et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26% // Nature Energy. – 2017. – Т. 2. – С. 17032.
- 19 Sanyo claims 98 micron-thick HIT solar cell with 22.8% efficiency. – 2009 (қолдану мерзімі: 13.10.2017). – базаға қол жеткізу режимі: [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20090923/175532/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090923/175532/)
- 20 Pluto New Technology Co., LTD A Leading Semiconductor Materials Solution Supplier. – (қолдану мерзімі: 15.10.2017). – базаға қол жеткізу режимі: <http://www.plutosemi.com/product.html>

### References

- 1 Y.V. Kryuchenko, A. V. Sachenko, A. V. Bobyl, V. P. Kostilyov, I. O. Sokolovskyi, E. I. Terukov and A. V. Smirnov, Energy Policy, 68, 116-122, (2014).
- 2 Surface meteorology and Solar Energy – NASA [electronic resource] (date of reference: 02.10.2017): <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- 3 Akorda.kz [electronic resource] (date of reference: 03.10.2017): [http://www.akorda.kz/ru/national\\_projects/expo-2017-v-astane](http://www.akorda.kz/ru/national_projects/expo-2017-v-astane)
- 4 Astana Solar [electronic resource] (date of reference: 03.10.2017): <http://astanasolar.kz/kk/news/kazakstanda-kun-energetikasynyn-damuy-shyndyk-zhne-perspektivalar>
- 5 M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E.D. Dunlop, Progress in photovoltaics: research and applications (version 42), 21(1), 1-11, (2013).
- 6 M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E.D. Dunlop, Progress in Photovoltaics, (version 42), 21(5), 827-837, (2013).
- 7 M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta and E.D. Dunlop, Progress in Photovoltaics, (version 43), 22(1), 1-9, (2014).
- 8 M.A. Maehlum, Energy Informative The Homeowner's Guide To Solar Panels, Best Thin Film Solar Panels— Amorphous, Cadmium Telluride or CIGS? Last updated 6 (2015).
- 9 Ghahremani and Fathy, A. E, Energy Science & Engineering, 4(5), 334-343, (2016).
- 10 R. Street, Technology and applications of amorphous silicon (Springer Science & Business Media, 2013), 417 p. DOI: 10.1002/ese3.131
- 11 M. Tanaka and Y. Kuwano, Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers, 31(11), 3518-3522, (1992). DOI: 10.1143/JJAP.31.3518
- 12 M. Tanaka and S. Kiyama, Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, a-C, 955-958, (2003).
- 13 Y. Tsunomura and M. Tanaka, Solar Energy Materials and Solar Cells, 93(6-7), 670-673, (2009). DOI: 10.1016/j.solmat.2008.02.037
- 14 R. Santbergen and M. Zeman, IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 35th, 748-753, (2010).
- 15 Terakawa, Proc. of the EUPVSEC, 26th, 2362-2365, (2011).
- 16 Y. Aya, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 20(2), 166-172, (2012).
- 17 K. Masuko, IEEE Journal of Photovoltaics, 4(6), 1433-1435, (2014).
- 18 K. Yoshikawa, Nature Energy, 2, 17032, (2017). DOI: 10.1038/nenergy.2017.32
- 19 Sanyo claims 98 micron-thick HIT solar cell with 22.8% efficiency [electronic resource] (date of reference: 13.10.2017): [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EN/20090923/175532/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20090923/175532/)
- 20 Pluto New Technology Co., LTD A Leading Semiconductor Materials Solution Supplier [electronic resource] (date of reference: 15.10.2017): <http://www.plutosemi.com/product.html>