

Код МРНТИ 53.03.17

*А.С. Серикканов, К.С. Жолдыбаев, Д.О. Кантарбаева, Б.Н. Мукашев
Физико-технический институт Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

МЕТОД ШЛАКОВОГО РАФИНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Аннотация. Солнечная энергетика на текущий момент – самый быстроразвивающийся сектор энергетики. Солнечные электростанции успешно конкурируют с традиционными источниками энергии по стоимости за единицу генерируемой энергии. Данная статья посвящена одному из методов очистки кремния без газовой фазы, для очистки использовался метод шлакового рафинирования. Очистка металлургического кремния проводилась шлаковым методом. Был исследован металлургический кремний, полученный классическим карботермическим методом. Затем была опробована металлургическая очистка шлаковым рафинированием, с использованием шлаков различного состава. Всего было рассчитано 9 различных новых составов для проведения 9 процессов шлакового рафинирования. Кремний, полученный в результате всех проведенных плавов, был проанализирован на содержание примесей.

Ключевые слова: металлургический кремний, фотоэнергетика, шлаковое рафинирование, шлак, элементный анализ, солнечная энергетика, шихта, индукционная печь, фотовольтаика, изложница.

Металлургиялық кремнийді тазартуға арналған шлақтық рафинадтау әдісі

Аңдатпа. Күн энергиясы ең қарқынды дамып келе жатқан энергетика саласы болып табылады. Іс жүзінде орнатылған қуаттар дамудың барлық болжамдарынан жоғары, сонымен қатар, күн электр станциялары өндірілген энергия бірлігінің құны бойынша дәстүрлі энергия көздерімен сәтті бәсекелеседі. Бұл мақала кремнийді газды фазасыз тазарту әдістерінің біріне арналған, тазалау үшін қожды тазарту әдісі қолданылды. Металлургиялық кремнийді тазарту шлақтық әдіспен жүргізілді. Классикалық карботермиялық әдіспен алынған металлургиялық кремний зерттелді. Содан кейін әртүрлі құрамдағы шлактарды пайдалана отырып, шлақты рафинадтау арқылы металлургиялық тазарту сынақтан өткізілді. Шлақтық рафинадтаудың 9 процесін жүргізу үшін барлығы 9 түрлі жана құрам есептелді. Барлық жүргізілген балқытулар нәтижесінде алынған кремний қоспалардың құрамына талданды.

Түйінді сөздер: металлургиялық кремний, фотоэнергетика, шлақтық рафинадтау, шлак, элементтік талдау, күн энергетикасы, шихта, индукциялық пеш, фотовольтаика, құймақалып.

Silicon purification by slag refining method

Abstract. Solar energy is the fastest growing branch of energy. Installed capacities are in fact ahead of all development forecasts, in addition, solar power plants successfully compete with traditional energy sources in terms of cost per unit of generated energy. This article is devoted to one of the methods of silicon purification without a gas phase, the slag refining method was used for purification. This paper presents the results of testing the first phase of metallurgical silicon purification. Purification was carried out by a slag refining method. Metallurgical silicon produced by the classical carbothermic method was investigated. Then a metallurgical purification by slag refining was tried, using slags of different composition. A total of 9 different new compositions were calculated for 9 slag refining processes. Silicon obtained as a result of all melts was analyzed for impurities.

Key words: metallurgy-grade silicon, photovoltaic, slag refining, slag, elemental analysis, solar energy, charge, induction furnace, photovoltaics, casting-form.

Введение

На сегодняшний день солнечная энергетика является самой быстроразвивающейся отраслью энергетики. Установленные мощности по факту опережают все прогнозы развития, кроме того, солнечные электростанции успешно конкурируют с традиционными источниками энергии по стоимости за единицу генерируемой энергии. Согласно обзору мирового рынка «солнечной» энергетики, за 2020 г. было установлено и подключено, в общей сложности, 756 ГВт установок преобразования солнечной энергии. Несмотря на «локдауны» в связи с Covid-19, спада рынка фотовольтаики¹ в 2020 г. не наблюдалось. Быстрорастущая конкурентоспособность солнечной энергии является одним из основных факторов развития в энергетическом

секторе за последние годы. По причине усовершенствования технологий как по очистке кремния, так и по созданию «солнечных» элементов (СЭ), наблюдается значительное уменьшение цены на «солнечную» электроэнергию², которая снизилась на 10% по сравнению с 2019 г. В 2020 г. цена электроэнергии, генерируемой за счет солнечных панелей, снизилась по сравнению с ветровой³. Несмотря на многочисленные исследования и новые материалы, используемые для создания солнечных элементов, кремний остается самым востребованным сырьем в солнечной энергетике. В настоящее время доля СЭ, созданных на базе кристаллического кремния, составляет порядка 95% против 5%, созданных на основе тонкопленочных технологий⁴⁻⁵. Стоимость солнечного

элемента значительно зависит от цены кремния, поскольку она составляет 70-75% стоимости СЭ. Для дальнейшего снижения цен СЭ, кроме усовершенствования технологии производства и уменьшения толщины пластин кремния, необходимы исследования и разработки по получению и очистке кремния, используемого как сырье для производства СЭ на базе кристаллического кремния.

Материалы и методы

Данная статья посвящена одному из методов очистки кремния без газовой фазы – методу шлакового рафинирования. Металлургические методы или, как их часто называют в литературе, физические, полностью исключают использование хлорсиланов⁵ [1]. Достижение необходимой чистоты кремния осуществляется путем использования высокочистых

¹International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV). / VDMA Photovoltaic Equipment [electronic resource]. – Germany, 2020. – 12 edition. URL: <https://itrvp.vdma.org/en/> (дата обращения 01.11.2022).

²A strategic research agenda for photovoltaic solar energy technology. // Photovoltaic technology platform, European communities [electronic resource]. – 2007. URL: www.euplatform.org/ (дата обращения 01.11.2022).

³DeCeuster D. High efficiency solar cells: promise and realization. // In: Proceedings of 20th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes. – Breckenridge (Colorado, USA), 2010.

⁴Cecaroli B., Lohne B. Solar Grade Silicon Feedstock. / Elkem solar, metallurgical solar silicon: third silicon conference, Munich, 2006.

⁵Aulich H. Solar grade silicon production and processing technology. // In: Proceedings of 20th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes. – Breckenridge (Colorado, USA), 2010.

исходных веществ: кварца и углерода с последующим применением металлургических и физико-химических переделов. Поэтому в мире планируется в краткий период увеличить производство «солнечного» кремния металлургическими методами, а их развитию и широкомасштабному использованию уделяется большое внимание. Так, например, компании Elkem (Норвегия), Waker (Германия), PhotoSil (Франция), SolSilc (Голландия), CaliSolar (США), CPI (США) и Semco Engineering (Франция) реализовали пилотные и/или промышленные проекты получения SOG-Si такими методами.

На основании результатов, приведенных в литературных источниках^{3,6} [2], а также ряда проведенных авторами предварительных исследований по данной тематике [3-5], дальнейшие работы по отработке и усовершенствованию технологий получения и очистки кремния до «солнечного» качества имеют перспективное и стратегическое значение для кремниевой промышленности Казахстана.

Результаты

Для проведения работ по очистке был использован Mg-Si, полученный широко известным методом карботермического восстановления. Использовался Mg-Si марки КР-0 в количестве 100 кг (ООО «РУСАЛ Кремний Урал»), примесный состав исходного металлургического кремния показан в табл. 1. Mg-Si массово производится по всему миру, но по причине недостаточной чистоты не может быть напрямую использован в качестве сырья для производства СЭ. Данный материал был выбран для экспериментальных работ по очистке по причине большей доступности данного материала. Весь кремний был издроблен до фракции не более 15 мм на дробильном аппарате Pulverisette 1, затем из него были отобраны пробы для проведения элементного анализа на определение примесей в исходном Mg-Si.

Элементный анализ всех проб для получения наиболее достоверной

Таблица 1
Примесный состав исходного металлургического кремния
Кесте 1
Бастапқы металлургиялық кремнийдің қоспалық құрамы
Table 1
Impurity composition of the original metallurgical silicon

Наименование пробы	Al	Fe	Ca	In	Ga	As	B	P
	ppmw							
Mg-Si исходный	1277	1551	1821	11	43	–	31	27

Таблица 2
Состав шихты для проведения процессов шлакового рафинирования
Кесте 2
Қожды тазартудың процесін жүргізуге арналған шихтаның құрамы
Table 2
The composition of the charge for carrying out processes of slag refining

Плавка		CaO	SiO ₂	CaF ₂	Na ₂ CO ₃	Al ₂ O ₃	MgO
Плавка №1	%	40	50	10	–	–	–
	кг	2	2,5	0,5	–	–	–
Плавка №2	%	60	30	10	–	–	–
	кг	3	1,5	0,5	–	–	–
Плавка №3	%	–	60	–	40	–	–
	кг	–	3	–	2	–	–
Плавка №4	%	10	50	10	30	–	–
	кг	0,5	2,5	0,5	1,5	–	–
Плавка №5	%	70	30	–	–	–	–
	кг	3,5	1,5	–	–	–	–
Плавка №6	%	40	40	–	–	20	–
	кг	2	2	–	–	1	–
Плавка №7	%	40	40	–	–	–	20
	кг	2	2	–	–	–	1
Плавка №8	%	40	40	–	–	10	10
	кг	2	2	–	–	0,5	0,5
Плавка №9	%	30	40	10	–	10	10
	кг	1,5	2	0,5	–	0,5	0,5

информации проводился двумя методами: атомно-эмиссионной спектроскопии с высокочастотной индуктивно связанной плазмой (АЭС ИСП) на спектрометре Optima 2000DV (Perkin Elmer) и рентгенфлуоресцентным методом (РФА) на приборе РЛП-21 (Аспап-Гео). Для определения были выбраны основные легирующие примеси (бор, фосфор, мышьяк, галлий и индий) и примеси металлов, оказывающих значительное негативное влияние на характеристики СЭ [4]. После дробления кремний был перемешан и разделен

на 9 частей для проведения 9 процессов шлакового рафинирования.

На базе проводившихся ранее исследований [3, 4] были выполнены расчеты по составу шихты для 9 процессов шлакового рафинирования. Плавку кремния проводили в индукционной печи «Параллель» ИПТ-100-2,4-0,075-Г-УХЛ4 мощностью 100 кВт с графитовым тиглем емкостью 60 л (рис. 1).

В качестве флюсов использовались смеси CaO, SiO₂, CaF₂, Na₂CO₃, MgO, Al₂O₃. При взаимодействии с примесью шлак может подниматься на поверхность расплавленного

⁶Kirscht F., Heuer M., Käs M., Rakotoniaina J.P., Jester T. Metallurgically refined silicon for photovoltaics. / Proc. 6th Internat Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells (CSSC-6). – Aix-les-Bains (France): Institute National de L'Énergie Solaire, 2012.

кремния, либо оседать на дно тигля и легко удаляться. Практика показала, что таким способом также можно удалять такие элементы как *B, Al, P, S, Ga, Ge, Sr*. Было проведено 9 процессов шлакового рафинирования с различным составом шихты для получения очищенного *Mg-Si* (*UMg-Si*). Разная шихта использовалась для определения более приемлемого состава, который покажет лучшую эффективность очистки. Состав проведенных плавков представлен в табл. 2.

После проведения шлакового рафинирования из каждой плавки были отобраны пробы для определения количества примесей в полученном кремнии (табл. 3). Для всех процессов шлакового рафинирования масса *Mg-Si* составляла 5 кг, отношение шлака к кремнию – 1:1.

Технологический регламент всех плавков был следующим:

- разогрев графитового тигля в печи до температуры 1200-1300°C;
- загрузка *Mg-Si* в объеме 1/3 от всей навески + 1/3 от добавляемой шлаковой смеси;
- плавление загруженной шихты;
- загрузка *Mg-Si* в объеме 1/3 от всей навески + 1/3 от добавляемой шлаковой смеси;
- плавление загруженной шихты;
- загрузка *Mg-Si* в объеме 1/3 от всей навески + 1/3 от добавляемой шлаковой смеси;
- плавление загруженной шихты;
- слив в графитовую изложницу.

Один из полученных слитков показан на рис. 2.

Обсуждение результатов

Негативное влияние различных элементов на характеристики солнечных элементов достаточно хорошо изучено, начиная с 80-х годов прошлого столетия. Результаты анализа (табл. 1) показали, что исходный *Mg-Si* содержит значительное количество примесей и не может быть использован в качестве сырья для производства «солнечного» кремния, требуется очистка до качества *UMg-Si*.

Для проведения процессов шлакового рафинирования выполнялись расчеты по составу шихты

Таблица 3

Примесный состав кремния после шлакового рафинирования

Кесте 3

Шлақты тазартудан кейінгі кремнийдің қоспалық құрамы

Table 3

Impurity composition of silicon after slag refining

Наименование пробы	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ca</i>	<i>In</i>	<i>Ga</i>	<i>As</i>	<i>B</i>	<i>P</i>
	ppmw							
Плавка №1	44	3890	708	5	111	–	12	58
Плавка №2	148	980	3379	1	28	–	12	37
Плавка №3	1295	2029	785	2	13	0,2	9	27
Плавка №4	184	2509	3396	8	96	0,074	9,5	56
Плавка №5	1802	2880	1018	14	84	0,384	11	43
Плавка №6	202	2542	921	8	70	0,053	11	49
Плавка №7	624	1868	1119	4	51	1,5	11	41
Плавка №8	593	1862	900	1,5	46	2,5	9	34
Плавка №9	30	2296	400	2,8	52	2,2	7	35

и операции, позволяющие реализовать следующие задачи: получение гомогенной фазы кремния; определение параметров плавки, количества шлака, отношения шлака к кремнию, количества и оптимального избытка SiO_2 , на образование гомогенной фазы кремния (модуль основности), порядка ввода шихты в расплав (технический регламент плавки) для полного расплавления составляющих шихты и кремния, и получения максимального выхода конечного продукта.

В среднем, выход очищенного кремния составил 4 кг, т. е. 80% от

массы загружаемого для очистки кремния (от 70% до 99%). По результатам проведенных процессов шлаковой очистки от примесей видно, что наиболее удачные – плавки №3, №8 и №9 (табл. 2). Следует отметить, что основной целью очистки являлась очистка от примеси бора⁷, имеющей коэффициент сегрегации 0,8-0,82. По причине высокого коэффициента сегрегации бор значительно меньше других примесей удаляется в процессе выращивания кристаллов кремния, порядка 80% бора переходит из расплава в кристалл⁷.

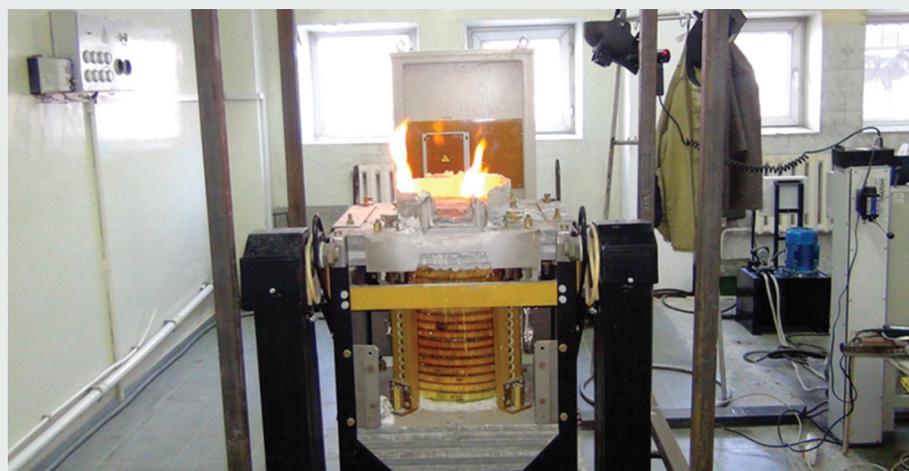


Рис. 1. Внешний вид индукционной печи «Параллель» при проведении шлакового рафинирования.

Сурет 1. Қожды тазарту кезіндегі «Параллель» индукциялық пешінің сыртқы көрінісі.

Figure 1. External view of the induction furnace «Parallel» during slag refining.

⁷Coletti G., *Impurities in silicon and their impact on solar cell performance.* / PhD Thesis. – Netherlands: Utrecht University, 2011.

Остальные примеси переходных металлов имеют коэффициенты сепарации порядка 10^{-5} - 10^{-6} и достаточно хорошо удаляются на этапе выращивания кристаллов кремния при направленной кристаллизации по методу Стокбаргера-Бриджмена. Достаточно высокое содержание фосфора, в свою очередь, может быть нивелировано примесью галлия без оказания дополнительных негативных эффектов на характеристики как кремния, так и солнечных элементов.

Заключение

В ходе проведенных исследовательских работ по очистке кремния металлургическими методами была отработана процедура проведения процесса шлаковой очистки металлургического кремния в индукционной печи с оптимальными параметрами. Определены оптимальные

составы шихты для металлургической очистки кремния.

Показано, что при выбранных режимах работы можно получать стабильные результаты по получению слитков очищенного кремния с достаточным выходом кремния по массе – до 99%. Кроме того, используемые для очистки составы шихты позволяют снизить концентрацию легирующей примеси бора в 3-5 раз. Элементные анализы, проведенные методами РФА и АЭС-ИСП позволяют контролировать процесс очистки на каждом этапе и получать достоверные результаты по контролируемым примесям.

Результаты работ [3, 4] показывают, что полученный кремний имеет достаточную чистоту для проведения следующих этапов очистки методами кислотного выщелачивания и направленной кристаллизации.



Рис. 2. Слиток очищенного кремния, полученного после процесса шлакового рафинирования.

Сурет 2. Қожды тазарту процесінен кейін алынған тазартылған кремнийдің күймасы.

Figure 2. Ingot of purified silicon obtained after the slag refining process.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Peter K., Korcesek R., Soiland A., Enebak E. Будущий потенциал для сырья SoG-Si из металлургического технологического маршрута. // Труды 23-й Европейской конференции по фотоэлектрической солнечной энергии. – Валенсия (Испания), 2008. – С. 947-950 (на английском языке)
2. Johnston M., Varati M. Распределение примесных элементов в равновесии шлак-кремний при окислительном рафинировании металлургического кремния для применения в солнечных элементах. // Солнечные энергетические материалы и солнечные элементы. – 2010. – №94. – С. 2085-2090 (на английском языке)
3. Mukashev B.N., Abdullin Kh. A., Tamendarov M.F., Turmagambetov T.S., Beketov B.A., Page M.R., Kline D.M. Металлургический маршрут для производства улучшенного кремния и моносилана. Солнечные энергетические материалы и солнечные батареи. – 2009. – №93/10. – С. 1785-1791 (на английском языке)
4. Kalygulov D., Klinovitskaya I., Turmagambetov T., Pavlov A., Plotnikov S., Mukashev B., Serikkanov A., Agabekov Zh., Kantarbaeva D. Высокотехнологичное производство фотоэнергии в Казахстане на базе Сарыкольского кварцевого месторождения. // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Физико-математическая серия. – 2019. – Т. 3. – №325. – С. 120-129 (на английском языке)
5. Betekbaev A.A., Mukashev B.N., Pelissier L., Lay P., Fortin G., Bounaas L., Skakov D.M., Pavlov A.A. Оптимизация легирования слитков кремния солнечного качества (SOG) для увеличения выхода слитков и эффективности элементов. // Современные электронные материалы. – 2016. – №2. – С. 61-65 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Peter K., Korcesek R., Soiland A., Enebak E. Металлургиялық процестен SoG-Si шикізатының болашақ әлеуеті. // Фотоэлектрлік күн энергиясы бойынша 23-ші Еуропалық конференция материалдары. – Валенсия (Испания), 2008. – Б. 947-950 (ағылшын тілінде)
2. Johnston M., Varati M. Күн батареяларын қолдану үшін металлургиялық кремнийді тотықтырғыш тазарту кезінде шлак-кремний тепе-теңдігінде қоспа элементтерінің таралуы. // Күн энергиясының материалдары және күн батареялары. – 2010. – №94. – Б. 2085-2090 (ағылшын тілінде)
3. Mukashev B.N., Abdullin Kh. A., Tamendarov M.F., Turmagambetov T.S., Beketov B.A., Page M.R., Kline D.M. Жақсартылған кремний мен моносилан өндірудің металлургиялық жолы. Күн энергиясының материалдары және күн батареялары. – 2009. – №93/10. – Б. 1785-1791 (ағылшын тілінде)

4. Kalygulov D., Klinovitskaya I., Turmagambetov T., Pavlov A., Plotnikov S., Mukashev B., Serikkanov A., Agabekov Zh., Kantarbaeva D. Сарыкөл кварц кен орны негізінде Қазақстанда жоғары технологиялық фотоэлектрлік өндіріс. // Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының материалдары. Физика және математика сериясы. – 2019. – Т. 3. – №325. – Б. 120-129 (ағылшын тілінде)
5. Betekbaev A.A., Mukashev B.N., Pelissier L., Lay P., Fortin G., Bounaas L., Skakov D.M., Pavlov A.A. Құйма шығымдылығын және ұяшық тиімділігін арттыру үшін күн сәулесінің кремний (SOG) құймаларын қоспалауды оңтайландыру. // Қазіргі электронды материалдар. – 2016. – №2. – Б. 61-65 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Peter K., Kopecek R., Soiland A., Enebakk E. Future potential for SoG-Si raw materials from the metallurgical process route. // Proceedings of the 23rd European Conference on Photovoltaic Solar Energy. – Valencia (Spain, 2008. – P. 947-950 (in English)
2. Johnston M., Barati M. Distribution of impurity elements in slag silicon equilibria for oxidative re-finishing of metallurgical silicon for solar cell applications. // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2010. – №94. – P. 2085-2090 (in English)
3. Mukashev B.N., Abdullin Kh. A., Tamendarov M.F., Turmagambetov T.S., Beketov B.A., Page M.R., Kline D.M. A metallurgical route to produce upgraded silicon and monosilane. // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2009. – №93/10. – P. 1785-1791 (in English)
4. Kalygulov D., Klinovitskaya I., Turmagambetov T., Pavlov A., Plotnikov S., Mukashev B., Serikkanov A., Agabekov Zh., Kantarbaeva D. High-tech production of photo-energy in Kazakhstan based on the Sarykol quartz deposit. News of the National Academy of Science of the Republic of Kazakhstan. Physico-mathematical series. – 2019. – Vol. 3. – №325. – P. 120-129 (in English)
5. Betekbaev A.A., Mukashev B.N., Pelissier L., Lay P., Fortin G., Bounaas L., Skakov D.M., Pavlov A.A. Doping optimization of solar grade (SOG) silicon ingots for increasing ingot yield and cell efficiency. // Modern Electronic Materials. – 2016. – №2. – P. 61-65 (in English)

Сведения об авторах:

Серикканов А.С., канд. физ.-мат. наук, директор Физико-технического института Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), abay@sci.kz; <https://orcid.org/0000-0001-6817-9586>

Жолдыбаев К.С., младший научный сотрудник Физико-технического института Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), gaisin_90@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0208-9104>

Кантарбаева Д.О., младший научный сотрудник Физико-технического института Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), dinara@sci.kz; <https://orcid.org/0000-0003-3891-8733>

Мукашев Б.Н., доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Физико-технического института Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), академик Национальной академии наук Республики Казахстан (г. Алматы, Казахстан), mukashev2005@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1391-2733>

Авторлар туралы мәліметтер:

Серикканов А.С., физика-математика ғылымдарының кандидаты, Satbayev University, Физика-техникалық институтының директоры (Алматы қ., Қазақстан)

Жолдыбаев К.С., Satbayev University, Физика-техникалық институтының кіші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан)

Кантарбаева Д.О., Satbayev University, Физика-техникалық институтының кіші ғылыми қызметкері

Мукашев Б.Н., физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, Satbayev University, Физико-техникалық институтының жетекші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының академигі (Алматы қ., Қазақстан)

Information about authors:

Serikkanov A.S., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director at the Institute of Physics and Technology of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Zholdybayev K.S., Junior Scientist at the Institute of Physics and Technology of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Kantarbayeva D.O., Junior Researcher at the Institute of Physics and Technology of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Mukashev B.N., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Scientist at the Institute of Physics and Technology of the Satbayev University (Almaty, Kazakhstan), Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Almaty, Kazakhstan)

Результаты исследований получены в рамках проекта AP08856059 «Оптимизация структуры тонких пленок для изготовления солнечных элементов на гибкой подложке», финансируемого Комитетом науки МОН РК.