

Код МРНТИ 31.15.19

*А.С. Серикканов, Т.С. Турмагамбетов, М.Ф. Тамендаров, Д.О. Кантарбаева
Satbayev University, Физика-техникалық институты (Алматы қ., Қазақстан)

АЛДЫН АЛА ШЛАКТЫҚ ТАЗАРУДАН ӨТКЕН МЕТАЛЛУРГИЯЛЫҚ КРЕМНИЙДІ ХИМИЯЛЫҚ ТАЗАРУ АӘДІСТЕРІ

Аннотация. Күн сапалы кремний алу үшін металлургиялық кремнийді химиялық тазарту әдісі анықталды. Шлақты тазарту балқымаңың кремний фазасына және әртүрлі оксидтер мен силицидтерден тұратын екінші фазаға бөлінуіне әкелетіндіктен, қожды алдын ала тазарту әдісі қышқылды тазарту кезінде металлургиялық кремнийдің жоғары тазалығына қол жеткізу мүмкіндігін ашатыны көрсетілген. Кремний қоспалары кремний түйіршіктерінің шекараларында шоғырланған екінші фазаға өтеді, бұл одан кейінгі қышқылды тазарту барысындағы ластану деңгейін айтарлықтай төмендетеді. Бұл зерттеуде металлургиялық кремнийді химиялық өңдеу кезеңдері әзірленді, материалдың бөлшектер мөлшері бойынша таралуы, сілтісіздендіру ерітіндісінің құрамы, химиялық тазалау процесінің уақыты мен температурасы оптималанды. Қоспа элементтері көмегімен ұнтақты кремний материалының аса тазалығына қол жеткізілді.

Түйінді сөздер: металлургиялық кремний, шлақты тазарту, шлак, жаңартылатын энергия, бағытталған кристалдану, концентрация, кремний, түйір, қышқылды тазарту, күн сапалы кремний.

Methods of chemical cleaning of metallurgical silicon subject to preliminary slag refining

Abstract. Methods of chemical purification of metallurgical silicon for obtaining solar-grade silicon have been developed. Preliminary slag refining opens up the possibility of achieving high purity of metallurgical silicon during acid purification due to the fact that slag refining leads to melt stratification into a silicon phase and a second phase consisting of various oxides and silicides. Impurities from silicon pass into the second phase, which is concentrated at the boundaries of silicon grains. The stages of chemical processing of metallurgical silicon have been developed, the granulometric composition of the material, the composition of the leaching solution, the time and temperature of the chemical purification process have been optimized. High purity of powdered silicon material for target impurity elements has been achieved.

Key words: metallurgical silicon, slag refining, slag, renewable energy, directional crystallization, concentration, silicon, grain, acid refining, solar grade silicon.

Методы химической очистки металлургического кремния, подвергнутого предварительному шлаковому рафинированию

Аннотация. Отработаны методы химической очистки металлургического кремния для получения кремния солнечного качества. Предварительное шлаковое рафинирование открывает возможность достижения высокой чистоты металлургического кремния в ходе кислотной очистки благодаря тому, что шлаковое рафинирование приводит к расслоению расплава на фазу кремния и вторую фазу, состоящую из различных оксидов и силицидов. Примеси из кремния переходят во вторую фазу, концентрирующуюся на границах зерен кремния, что делает последующую кислотную очистку весьма эффективной для уменьшения уровня загрязнений. Отработаны этапы химической обработки металлургического кремния, оптимизированы granulometric состав материала, состав раствора для выщелачивания, время и температура процесса химической очистки. Достигнута высокая чистота порошкового кремниевого материала по целевым примесным элементам.

Ключевые слова: металлургический кремний, шлаковое рафинирование, шлак, возобновляемая энергия, направленная кристаллизация, концентрация, кремний, зерно, кислотная очистка, кремний солнечного качества.

Кіріспе

Табиғи қазба отындарының сарқылуы және экологиялық мәселелер секілді бірқатар себептерге байланысты, қазіргі уақытта электр энергиясын өндіру кезінде экологияны ластайтын және климаттың өзгеруіне ықпал ететін парниктік газдар шығарындыларын шығармайтын таза және жаңартылатын энергия көздерімен бірге күн фотовольтаикасы да қарқынды дамып келеді [1, 2]. Ұлан асыр аумақта орналасқан көп түрлі шаруашылығы бар Қазақстан үшін энергиямен жабдықтауды орталықсыздандыру экономикалық және әлеуметтік дамуға ықпал ететін маңызды фактор болып табылады. Тұрғын үйлердің, ғимараттардың, фермалардың шатырларына және жерге орнатуға болатын күн фотовольтаикалық панельдері орталықтандырылған электр желілеріне жүктемені азайтып, электр берудегі шығындарды азайта отырып, шалғайдағы желіден тыс аймақтарда өмір сүру сапасын жақсартады.

Күн батареяларының басым бөлігін өндіруге арналған негізгі материал – бұл күн сапалы поликристалды кремний, оның нарықтық құны қоспалар концентрациясына талаптардың аздығына байланысты жоғары таза монокристалды жартылай өткізгіш кремнийге қарағанда айтарлықтай төмен [3–7]. Дегенмен, күн сапасындағы кремнийдің құнын одан әрі төмендету дегеніміз – күн батареяларының бағасын арзандату және қолжетімділігін арттыру үшін өте өзекті мәселе, өйткені күн батареялары құнының айтарлықтай үлесі фотоэлементтер жасалған материалдың құнымен анықталады.

Дәстүрлі хлорсилан әдісі арқылы поликристалды кремний алу айтарлықтай энергия шығынын қажет етеді, сондықтан шикізат ретінде арзан металлургиялық кремнийді пайдалана отырып, күн сапалы кремний өндіру әдістері экономикалық үнемді балама болып табылады. Көп мөлшерде қажетсіз қоспасы бар металлургиялық кремнийді күн сапасындағы кремнийге ауыстыру үшін қоспалардан тазарту мен оны жоюдың түрлі әдістері қолданылады [3–7]. Бұл әдістерді бірнеше негізгі санаттарға бөлуге болады: газ-фазалы тазарту – кремнийді алдымен ұшпа қосылыстарға айналдыратын, содан кейін газ-фазалық тазартылып, термиялық ыдыратылатын әдіс, өнеркәсіптік ауқымда жоғары тазалықтағы кремнийді де, күн сапалы кремнийді де өндіру үшін қолданылады.

Қожды өңдеу арқылы металлургиялық өңдеудің экономикалық тиімділігі жоғары. Бұл әдісте кремнийдің балқыту фазасына көбінесе төмен балқытын қосылыстар енгізіледі, бұл қосылыстар металлургиялық кремнийдегі артық қоспалармен әрекеттеседі де, осы фазалардағы қоспалардың жоғары ерігіштігіне байланысты оларды адсорбциялайды. Нәтижесінде, салқындағаннан кейін балқыма қабатталып, ал қоспалар екінші, шлак фазасына түседі.

Қоспалардан арылту үшін қышқыл немесе сілтілермен химиялық улау қолданылады. Бұл процесс қоспалар поликристалды кремний түйіршіктерінің шекарасы мен бетінде шоғырланған жағдайда тиімді болады.

Аймақтық балқыту және бағытты қатаю тиімді өңдеу процесі болып табылады. Бұл әдістерде тазарту кремнийдің сұйық фазасындағы қоспалардың қатты фазамен

салыстырғанда ерігіштігінің жоғары болуына байланысты жүреді, бұл үздіксіз кристалдану фронты болған кезде қоспаларды балқымаға ығыстыруға және балқыманың кристалдануы кезінде қоспалардың концентрациясын айтарлықтай төмендетуге мүмкіндік береді.

Тотығу және плазмалық өңдеу – мұндай өңдеу әдістерін қолдану негізінен беттік ластанудан тазарту үшін тиімді.

Бұл әдістерді үйлестіре отырып, бірге қолданғанда тиімдірек және қоспалардың тазалығы мен концентрациясы бойынша күн кремнийінің қажетті параметрлеріне жақындауға мүмкіндік береді. Біз осыған дейін металлургиялық кремнийді тазарту үшін қожды тазарту әдісі бойынша зерттеулер жүргіздік [8–10] және химиялық тазарту бойынша зерттеулерді қолға алған болатынбыз. Бұл жұмыста металлургиялық кремнийді шлактау арқылы алынған кремний қорытпаларын химиялық тазарту бойынша тәжірибелердің нәтижелері берілген.

Бастапқы материалдар

Құрамында кремнийі бар бастапқы материал ретінде бірқатар негізгі және қышқыл оксидтерді, сонымен қатар фторидтерді, мысалы, CaO , SiO_2 , CaF_2 , MgO , BaF_2 , BaO , LiF және т. б. қоспаларды қолдану арқылы металлургиялық кремний $MG-Si$ тазарту арқылы алынған тәжірибелік балқыту кезінде алынған кремнийі бар қорытпалардың үлгілері пайдаланылды [8–10].

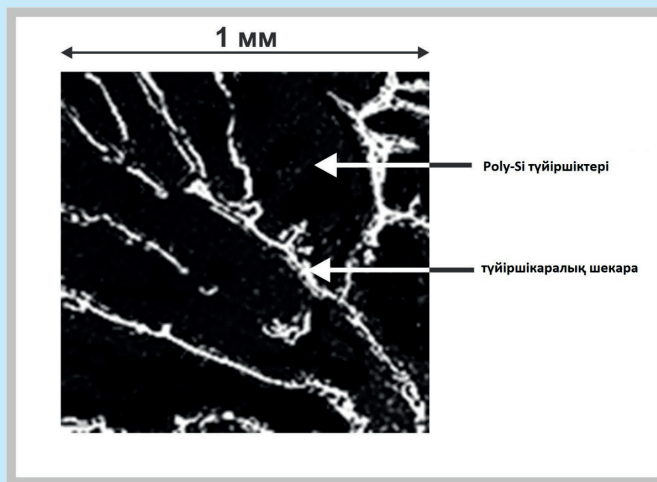
Қожға бор және фосфор сияқты қоспаларды алу үшін шлақтың негізділігі, яғни негізгі және қышқыл оксидтердің қатынасы (салмағы бойынша) 2-ден жоғары сақталды.

Қожды өңдеу сонымен қатар силицидтердің екінші фаза түріндегі тиімді түзілуіне әкелді, бұл силицидтік фазадағы қоспа атомдарының жоғары ерігіштігінен кремнийден қоспаларды кетіруге ықпал етті.

Мұндай поликристаллды қорытпаларда кристалл түйіршіктері кремний болып табылады, ал қажетсіз қоспалардың негізгі бөлігі 1-суреттегі диаграммада көрсетілгендей екінші фазалық тұнбаларда түйіршік шекараларында шоғырланған. Қоспалар дәндердің шекараларында балқыманың салқындату процесінде сегрегация эффектісінің нәтижесінде де концентрацияланады. Балқыманы салқындату кезінде кристалдану орталықтары пайда болады және кристалдар өскен сайын төмен сегрегация коэффициенті бар элементтер, негізінен металл қоспалары пайда болған түйірлердің шекарасына итеріледі. Осылайша, қоспалар кристалдық түйіршіктердің шекарасында шоғырланған. Бұл химиялық тазартуды фракциялық елеуішпен біріктіруді өте тиімді әдіс етеді. Екінші жағынан, бор мен фосфор сияқты сегрегация коэффициенті жоғары элементтер түйіршіктер мен оның шекаралары бойынша біркелкі таралады. Сондықтан кремнийдің сипаттамаларына теріс әсер ететін бор мен фосфордың қоспаларын жою үшін шлақтың ерекше құрамы қажет.

Эксперименттік нәтижелер

Қышқылды тазартудың түрлі әдістері сыналды және әртүрлі тиімділігін көрсетті. Атап айтқанда, қолданылатын реагенттер мен қышқылдардың әртүрлі түрлерінің негізгі қоспа элементтерін, сондай-ақ фосфидтерден, боридтерден және кремний карбидтерінен тұратын екінші



Сурет 1. Металлургиялық кремнийді шлақтық рафинадтаудан кейін алынған поликристалды кремний poly-Si құрылымын көрсететін сызба.

Figure 1. Schematic diagram showing the structure of polycrystalline silicon poly-Si obtained after slag refining of metallurgical silicon.

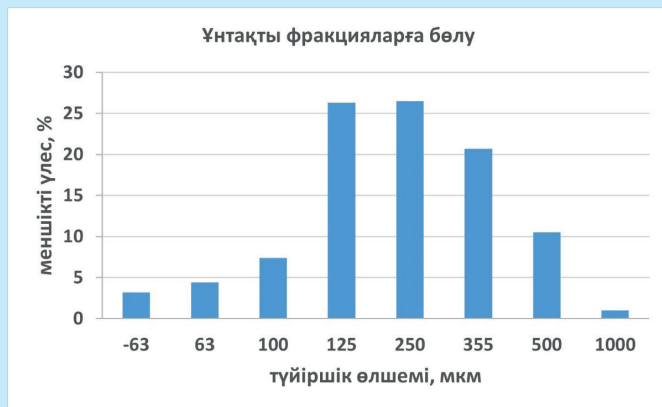
Рис. 1. Схема, показывающая структуру поликристаллического кремния poly-Si, полученного после шлакового рафинирования металлургического кремния.

фазаны жою тиімділігіне әсері зерттелді. Бөлшектердің мөлшеріне, сілтісіздендіру уақытына, процестің температурасына байланысты кремнийді тазарту тиімділігі зерттелді.

Металлургиялық кремнийді қышқылда өңдеу механикалық араластырғышпен араластыра отырып, тефлонды ыдыстарда жүргізілді. Бөлме температурасына дейін ауада өндеп, салқындатқаннан кейін ерітінді кремнийден декантация арқылы бөлініп, бейтараптандыру және пайдалану үшін ыдысқа құйылады. Қожды тазартудан кейін және қышқылмен тазалау алдында шлактан металлургиялық кремнийдің үлгісі бөлініп алынды, бетінің ауданын ұлғайту және тазалау процесін жылдамдату үшін ірі бөлшектер ірі ұнтаққа дейін ұсақталды.

Металлургиялық кремнийді қышқылдық-химиялық тазарту әдісі қышқылдардың кремнийде болатын оксидтер мен силицидтердің екінші фазасы түріндегі қоспаларды түйірлер шекарасында іріктеп еріту қабілетіне негізделген. Оның үстіне кремний түйірлері қолданылатын қышқылдарда ерімейді. Қышқылдар түйіршікаралық кеңістікке еніп, қожды тазартудан кейін алынған материалдың фракцияларға бөлінуін тудырады. Механикалық електерді қолдану арқылы кейінгі гранулометрия материалды фракцияларға бөлуге мүмкіндік береді. 2-суретте кремний түйіршіктерінің мөлшеріне байланысты қышқыл ерітіндісінде ($3M HNO_3$) өндеуден кейінгі әрбір ұнтақ фракциясының үлесі (% массада) көрсетілген.

Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде қоспаларды тиімді жою үшін оңтайлы өңдеу режимдері анықталды. Өңдеу жүргізілген сайын тазалау тиімділігі артып, өңдеу уақыты қысқарды. Өңдеу уақыты бойынша шамамен 80 °C температура оңтайлы болды. Су бар қышқыл ері-



Сурет 2. Қышқыл ерітіндісіндегі өңдеуден кейінгі түйір өлшеміне байланысты кремний ұнтағы фракцияларының мөлшері.

Figure 2. The content of silicon powder fractions depending on the grain size after treatment in an acid solution.

Рис. 2. Содержание фракций кремниевого порошка в зависимости от размера зерен после обработки в кислотном растворе.

тінділерінің концентрациясы және кремний ұнтағының қышқылға массалық қатынасы материалды тұтыну мен процестің тиімділігін төмендету үшін оңтайландырылған. Азот қышқылында өңдеудің екі кезеңін жүргізу бір реттік өңдеуге қарағанда тиімдірек болды, бірақ үш рет өңдеудің нәтижесі айтарлықтай айқын емес. Үшінші өңдеуді кремний ұнтағы мен қышқылдың бірдей қатынасында $\text{HF} + \text{HNO}_3$ қышқылдарының су бар қоспасында жүргізгенде, қоспаларды кетіру дәрежесі айтарлықтай өсті. Мұндай өңдеудің тиімділігі температураға тәуелді емес, сондықтан кремнийдің тотыққан формаларын (SiO , SiO_2) оларда еріген қоспалармен жою үшін қышқыл қоспасында өңдеу бөлме температурасында жүргізілді. Қышқылдық өңдеу аяқталғаннан кейін кремний ұнтағы ерітіндіден декантация арқылы бөлініп, ерітінді қышқылдығы бейтарап болғанша тазартылған сумен жуылады және тұрақты салмаққа жеткенше электр пешінде кептірілді.

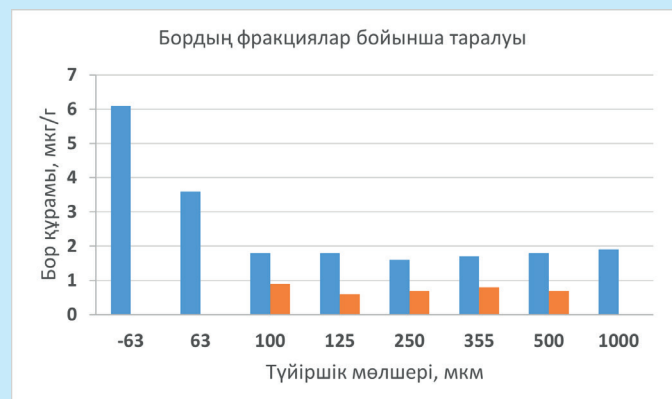
Жүргізілген жұмыстардың талдауы алдын ала шлаг тазалауға ұшыраған металлургиялық кремнийді қышқылмен өңдеу Al , Ca , Fe қоспаларын қоспағанда, бірқатар қоспалардың (K , Na , Cr , Sr , Mn , Cu) концентрациясын күн сапалы кремний деңгейіне дейін төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Шамасы, Al , Ca , Fe қоспаларының жоғары концентрациясы қожды тазалау сатысында CaO , SiO_2 , CaF_2 , Na_2CO_3 , MgO , Al_2O_3 флюстерін енгізген кезде осы қоспалармен айтарлықтай ластануды енгізумен түсіндіріледі. Әртүрлі қоспалар үшін қышқылды тазартудың тиімділігі бастапқы үлгідегі қоспа концентрациясының қышқылмен өңдеуден кейінгі осы қоспаның концентрациясына қатынасына тең тазарту коэффициенті K арқылы бағаланды. Негізгі қоспалар үшін ол: алюминий қоспалары үшін $K \sim 60$, кальций қоспалары үшін ~ 50 , ал темір қоспалары үшін ~ 200 құрайды.

Сондай-ақ шағын фракцияларда (63 мкм немесе одан аз) қоспалардың көп бөлігі, атап айтқанда, бор атомдары

шоғырланатыны анықталды (3-сурет). Сондықтан бұл фракциялар тазарту процесінен шығарылды және материалдың жоғалуы аз ғана, өйткені бұл ұсақ фракциялар салмағы бойынша шамамен 7,5% құрайды (2-сурет).

Қазірдің өзінде бөлшектердің өлшемдерінің бастапқы таралуы қоспалар концентрациясының фракция өлшеміне айтарлықтай тәуелділігін көрсетеді. Мысал ретінде 3-суретте (көк бағаналар) кремний түйіршіктеріндегі бор қоспаларының мөлшері ерітіндіде өңделгеннен кейін олардың мөлшеріне байланысты қалай өзгергені көрсетілген, бұл бастапқы ұнтақты аз фракцияларға тиімді бөлуді тудырды. Бұл жағдайда FeCl_3 сулы ерітіндісі (концентрация 10%) қолданылды. Кішкентай фракциялардың қоспалармен байытылғанын көруге болады. Сондықтан тазартылған кремний алу үшін ұсақ фракцияларды қолданбаған дұрыс.

Бор қоспаларының қайта бөлінуіне қожды тазалау процесінің белгілі бір параметрлері (қождың сұйықтығы, араластыру кезіндегі балқыманың біртектілігі, фазалық бөлуге жеткілікті уақыт және т. б.) тиімді әсер ететіндігі анықталды. Бор қоспасының едәуір бөлігі кремний түйіршіктерінің бетінде, шамасы, кремний оксидінің жұқа қабатында шоғырланған, өйткені SiO_2 қабаты, сондай-ақ беті қоспалар үшін тиімді ағын болып табылады. Бұл ұнтақты фторлы және азот қышқылдарының әлсіз ерітіндісінде өңдеу 3-суретте (қызыл бағаналар) көрсетілгендей бор қоспаларының концентрациясын айтарлықтай төмендететіндігімен дәлелденді. Бұл өңдеу кремний түйіршіктерінің оксидті қабатының да, жер бетіне жақын аймағының да қышқылдануына әкеледі.



Сурет 3. Қожды тазартудан кейінгі ұнтақ фракцияларындағы бор қоспасының концентрациясының деңгейі (көк бағана) және фторлы және азот қышқылдары қоспасында (қызыл бағана) өңдеуден кейін кремнийдегі бор мөлшерінің төмендеуі.

Figure 3. The concentration level of the boron mixture by powder fractions after slag purification (blue columns) and a decrease in the boron content in silicon after etching in a mixture of hydrogen fluoride and nitric acid (red columns).

Рис. 3. Уровень концентрации примеси бора по фракциям порошка после шлаковой рафинации (синие столбцы) и уменьшение содержания бора в кремнии после травления в смеси фтористоводородной и азотной кислот (красные столбцы).

Алдын ала қожды тазартудан өткен металлургиялық кремнийді қышқылмен тазарту процесін оңтайландыру нәтижесінде 4-суретте көрсетілген қоспалар концентрациясының деңгейіне қол жеткізілді, егер алдын ала қожды тазарту сатысы болмаса, қоспалар деңгейі бірнеше рет жоғары болады және оны қайталап қышқылмен тазарту кезінде де азайту мүмкін емес.

Қорытынды

Тәжірибелерді талдау және қышқылмен тазалаудан кейінгі қоспа элементтерінің концентрациясы туралы мәліметтер негізінде маңызды қорытындылар төмендегідей. Біріншіден, металлургиялық кремнийді қожды тазартудың алдын ала сатысынсыз тазарту мүмкін емес немесе өте қиын, өйткені бұл кезеңде қоспалардың артық концентрациясы кремний фазасынан аталған тазарту кезінде пайда болған екінші фазаға қайта бөлінеді. Оксидтерден, фторидтерден, силицидтерден және т. б. тұратын екінші фаза кремнийдікінен өзгеше тығыздыққа ие және мақсатты өнімнен оңай бөлінуі мүмкін. Сонымен қатар кремний поликристалдарының шекарасында қоспаларды шоғырландыратын екінші фаза да түзіледі. Бұл жағдай кейіннен қышқылмен тиімді тазалауға мүмкіндік береді.

Алдын ала шлақтық тазартуға ұшыраған металлургиялық кремнийдің ұсақ фракциясы қоспалардың жоғары концентрациясын қамтиды, сондықтан олардың мақсатты өнімін салмағы бойынша шамамен 7% жоғалтумен алып тастауға болады. Қышқылды тазартудың бірінші кезеңінде қоспа элементтерінің концентрациясының айтарлықтай төмендеуі байқалғанымен, бір тазарту сатысы жеткіліксіз, бірақ екінші және үшінші кезеңде тазарту тиімділігін арттыру үшін қышқылдардың түрін өзгерту қажет. Тазарту-



Сурет 4. Шлақты тазартудан және қышқылмен сілтісіздендіруден кейінгі кремнийдің қоспалық құрамы.

Figure 4. Impurity composition of silicon after slag refining and acid leaching.

Рис. 4. Примесный состав кремния после проведения шлакового рафинирования и кислотного выщелачивания.

дың максималды тиімділігі металлургиялық кремнийдің 100–500 мкм фракциясында қол жеткізіледі. Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде негізгі қоспа элементтері үшін кремний ұнтағының жоғары тазалығына қол жеткізілді, алайда күн сапалы кремнийге қол жеткізу үшін бағытталған кристалданудың соңғы кезеңі қажет.

Алғыс

Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті, ИРН № АР19677333 гранты қаржыландырады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Күн фотоэлектрлері тұрақты болашақты қуаттандыруға дайын / Виктория М. [және т. б.] // Джоуль. 2021. Т. 5. № 5. Б. 1041–1056 (ағылшын тілінде)
2. Жаңартылатын энергия көздерін жан-жақты зерттеу: жіктеулер, қиындықтар мен ұсыныстар / Анг Т.З. [және т. б.] // Энергия стратегиясының шолулары. 2022. № 43. Б. 100939 (ағылшын тілінде)
3. Күн деңгейіндегі поликристалды кремнийді өндірудің жаңа процестері: шолу / Брага А.Ф.Б. [және т. б.] // Күн энергиясының материалдары және күн батареялары. 2008. № 92. Б. 418–424 (ағылшын тілінде)
4. Чигондо Ф. Металлургиялық дәрежеден күн кремнийіне дейін: шолу // Кремний. 2018. Т. 10. Б. 789–798 (ағылшын тілінде)
5. Баснет Р., Макдональд Д. UMG-Si пластиналарындағы ақауларды азайту стратегияларына шолу // Фотоникадағы шекаралар. 2024. Т. 4. С. 1331471 (ағылшын тілінде)
6. Ли М., Дай Ю., Ма В., Ян Б., Чу К. Металлургиялық әдіспен кристалды кремнийлі күн батареяларының материалдарын дайындаудың жаңа технологиясына шолу // IOP конференциялар сериясы: жер және қоршаған орта туралы ғылым, IOP, 2017. Т. 94. № 1. Б. 012016 (ағылшын тілінде)
7. Немчинова Н.В., Зайцева А.А. Қоспалардан қышқылды тазарту арқылы металлургиялық кремнийдің сапасын жақсарту // АйПолитех Журнал. 2023. Т. 27. № 2. Б. 436–448 (орыс тілінде)
8. Кремний мен моносилан өндірудің қазақстандық технологияларын күн батареялары мен панельдерін өндірудің қолайлы әлемдік тәжірибелерімен интеграциялау / Серикканов А. [және т. б.] // Процестер. 2022. Т. 10. № 7. Б. 1303 (ағылшын тілінде)

9. Серикканов А. Кремнийді металлургиялық әдістермен тазарту мүмкіндігі: I бөлім / Серикканов А. [және т. б.] // Процестер. 2022. Т. 10. № 7. Б. 1353 (ағылшын тілінде)
10. Тазарту үшін қожды тазарту үшін металлургиялық кремнийді тазарту / Серикканов А.С. [және т. б.] // Қазақстанның тау-кен журналы. 2022. № 11. Б. 42 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future / Victoria M. [et al.] // Joule. 2021. V. 5. No. 5. 1041–1056 pp. (in English)
2. A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions / Ang T.Z. [et al.] // Energy Strategy Reviews. 2022. No. 43. 100939 p. (in English)
3. New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review / Braga A.F.B. [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2008. No. 92. 418–424 pp. (in English)
4. Chigondo F. From Metallurgical-Grade to Solar-Grade Silicon: An Overview // Silicon. 2018. V. 10. 789–798 pp. (in English)
5. Basnet R., Macdonald D. A review of defect mitigation strategies for UMG-Si wafers // Frontiers in Photonics. 2024. V. 4. 1331471 p. (in English)
6. Li M., Dai Y., Ma W., Yang B., & Chu Q. Review of new technology for preparing crystalline Silicon solar cell materials by metallurgical method // IOP conference series: earth and environmental science, IOP, 2017. V. 94. No. 1. 012016 p. (in English)
7. Nemchinova N.V., Zaitseva A.A. Povyshenie kachestva metallurgicheskogo kremniya putem kislotnoi ochistki ot primesei [Improving the quality of metallurgical silicon by acid purification from impurities], AiPolitekh Zhurnal [iPolytech Journal]. 2023. V. 27. No. 2. 436–448 pp. (in Russian)
8. Integration of Kazakhstan technologies for silicon and monosilane production with the suitable world practices for the production of solar cells and panels / Serikkanov A. [et al.] // Processes. 2022. V. 10. No. 7. 1303 p. (in English)
9. The Possibility of Silicon Purification by Metallurgical Methods: Part I / Serikkanov A. [et al.] // Processes. 2022. V. 10. No. 7. 1353 p. (in English)
10. Metod shlakovogo rafinirovaniya dlya ochistki metallurgicheskogo kremniya [Method of slag refining for purification of metallurgical silicon], Serikkanov A.S. [et al.], Gornyi Zhurnal Kazakhstana [Mining Journal of Kazakhstan]. 2022. No. 11. 42 p. (in Russian)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Солнечная фотоэлектрика готова обеспечить устойчивое будущее / Виктория М. [и др.] // Джоуль. 2021. Т. 5. № 5. С. 1041–1056 (на английском языке)
2. Комплексное исследование возобновляемых источников энергии: классификации, проблемы и предложения / Анг Т.З. [и др.] // Обзоры энергетической стратегии. 2022. № 43. С. 100939 (на английском языке)
3. Новые технологии производства поликристаллического кремния солнечного качества: обзор / Брага А.Ф.Б. [и др.] // Материалы для солнечной энергетики и солнечные элементы. 2008. № 92. С. 418–424 (на английском языке)
4. Чигондо Ф. От металлургического кремния к солнечному: обзор // Кремний. 2018. Т. 10. С. 789–798 (на английском языке)
5. Баснет Р., Макдональд Д. Обзор стратегий устранения дефектов пластин UMG-Si // Рубежи в фотонике. 2024. Т. 4. С. 1331471 (на английском языке)
6. Ли М., Дай Ю., Ма В., Ян Б., Чу К. Обзор новой технологии получения материалов для солнечных элементов из кристаллического кремния металлургическим методом // Серия конференций IOP: наука о земле и окружающей среде, IOP, 2017. Т. 94. № 1. С. 012016 (на английском языке)
7. Немчинова Н. В., Зайцева А. А. Повышение качества металлургического кремния путем кислотной очистки от примесей // АйПолитех Журнал. 2023. Т. 27. № 2. С. 436–448 (на русском языке)
8. Интеграция казахстанских технологий производства кремния и моносилана с подходящими мировыми практиками производства солнечных элементов и панелей / Серикканов А. [и др.] // Процессы. 2022. Т. 10. № 7. С. 1303 (на английском языке)
9. Возможность очистки кремния металлургическими методами: часть I / Серикканов А. [и др.] // Процессы. 2022. Т. 10. № 7. С. 1353 (на английском языке)
10. Метод шлакового рафинирования для очистки металлургического кремния / Серикканов А.С. [и др.] // Горный журнал Казахстана. 2022. № 11. С. 42 (на русском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Серикканов А.С., физика-математика ғылымдарының кандидаты, «Физика-техникалық институты» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), a.serikkanov@sci.kz; <https://orcid.org/0000-0001-6817-9586>

Турмагамбетов Т.С., Ph.D., «Физика-техникалық институты» ЖШС ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), ttleuzhan@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8929-5519>

Тамендаров М.Ф., физика-математика ғылымдарының кандидаты, «Физика-техникалық институты» ЖШС жетекші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), tamendarov.m@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4160-8047>

Кантарбаева Д.О., магистр, «Физика-техникалық институты» ЖШС кіші ғылыми қызметкері (Алматы қ., Қазақстан), d.kantarbayeva@sci.kz; <https://orcid.org/0000-0003-3891-8733>

Information about the authors:

Serikkanov A.S., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Physics and Technology LLP (Almaty, Kazakhstan)

Turmagambetov T.S., Ph.D, Researcher, Institute of Physics and Technology LLP (Almaty, Kazakhstan)

Tamendarov M.F., Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Physics and Technology LLP (Almaty, Kazakhstan)

Kantarbayeva D.O., Master's degree, Junior Researcher, Institute of Physics and Technology LLP (Almaty, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Серикканов А.С., канд. физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт» (г. Алматы, Казахстан)

Турмагамбетов Т.С., Ph.D, научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт» (г. Алматы, Казахстан)

Тамендаров М.Ф., канд. физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт» (г. Алматы, Казахстан)

Кантарбаева Д.О., магистр, мл. научный сотрудник ТОО «Физико-технический институт» (г. Алматы, Казахстан)

ДЕСЯТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

SEYMARTEC DIGITAL

ЧЕЛЯБИНСК
ОТЕЛЬ «RADISSON BLU»

25-27
НОЯБРЯ

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ
В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ
ОТРАСЛИ



seymartec.ru



+7 499 638-23-29



info@seymartec.ru