

КРЕМНИЙ КАРБИДІ: СИНТЕЗ ӘДІСТЕРІ, ҚАСИЕТТЕРІ, ҚОЛДАНУ САЛАЛАРЫНА ЖӘНЕ НАРЫҒЫНА ШОЛУ

БУРУМБАЕВ А.Г. 

Бурумбаев Азамат Галимжанович – 3 курс докторанты, техника ғылымдарының магистрі, кіші ғылыми қызметкер, Ж. Абишев атындағы Химия-металлургия институты, Қарағанды қ., Қазақстан
E-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Аңдатпа. Бұл мақала кремний карбидіне (SiC) арналған және оның синтез әдістеріне, физика-химиялық қасиеттеріне, қолдану салаларына, сондай-ақ әлемдік нарығының даму үрдістеріне кешенді ғылыми шолу жасауға бағытталған. Жұмыста SiC алудың негізгі өндірістік және зертханалық технологиялары қарастырылған, соның ішінде классикалық Ачесон әдісі, Лели әдісі және оның модификацияланған физикалық бу фазасындағы тасымалдау (PVT) нұсқасы, өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез (SHS), сондай-ақ көлемдік жану әдістері қамтылған. Әрбір синтез тәсілінің технологиялық ерекшеліктері, энергия сыйымдылығы, алынатын өнімнің құрылымдық-морфологиялық сипаттамалары, тазалық дәрежесі мен практикалық қолдану мүмкіндіктері тұрғысынан салыстырмалы талдау жүргізілген.

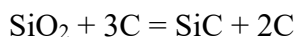
Кремний карбидінің жоғары қаттылығы, термиялық және химиялық тұрақтылығы, тозуға төзімділігі, сондай-ақ кең тыйым салынған аймақты жартылай өткізгіш ретіндегі бірегей электрлік қасиеттері оның абразивті материалдарда, отқа төзімді керамикада, қуат электроникасында, автомобиль, энергетика және аэроғарыш өнеркәсібінде кеңінен қолданылуын қамтамасыз ететіні көрсетілген. Сонымен қатар, SiC әлемдік нарығы өнім түрлері, қолдану салалары және географиялық аймақтар бойынша талданып, Азия–Тынық мұхиты өңірінің жетекші позициясы ерекше атап өтілген.

Мақалада кремний карбиді өндірісін дамыту стратегиялық тұрғыдан маңызды екендігі негізделіп, жоғары қосылған құнды функционалдық материал ретінде оның болашағы зор екені көрсетіледі. Ұсынылған шолу нәтижелері SiC синтезі, қасиеттерін жетілдіру және оны өнеркәсіптік қолдану бағытындағы ғылыми-зерттеу жұмыстарын әрі қарай дамыту үшін пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: кремний карбиді, SiC, синтез әдістері, Ачесон әдісі, PVT, SHS, жартылай өткізгіштер, нарықтық шолу.

Кіріспе

Кремний карбидін (SiC) зерттеу 1824 жылы Якоб Берцелиуспен басталды және Деспретс (1849), Марсден (1880) және Колсон (1882) еңбектерінде жалғасын тапқан еді. Табиғи жағдайда SiC сирек кездеседі, кимберлитті түтіктерінде шамалы мөлшерде кездеседі, бірақ SiC ғарыштық кеңістікте кең таралған, оның шоғырланған дақты түрлерін метеориттерде жиі кездестіруге болады. Алғашқы SiC кристалдары Генри Моиссанның Аризона шөліндегі каньондардағы метеориттерді зерттеу кезінде табылды (Moissan), оның құрметіне минерал моиссанит деп аталды. Қазіргі уақытта поликристалды SiC электр пештерінде 1800-2300 °C температурада кремний диоксидін көміртегімен тотықсыздандыру арқылы алынады:



SiC – периодтық жүйенің IV тобының элементтерінен түзілген жалғыз бинарлық қосылыс болып саналады. Химиялық байланыс түрі бойынша ол ковалентті кристалдарға жатады. Күшті химиялық байланыстар оның химиялық, радиациялық, температуралық және механикалық беріктігін анықтайды.

SiC негізгі қасиеттері төменде 1 кестеде келтірілген.

Кесте 1. SiC негізгі қасиеттері

Балқу температурасы	2730 °С
Тығыздығы	3,21 г / см ³
Қаттылығы Моос шкаласы бойынша	9-9,5
Термиялық кеңею коэффициенті	4,0*10 ⁻⁶ К
Электр өткізгіштігі	жартылай өткізгіш
Тыйым салынған аймақтың ені	2,36-3,23 эВ
Байланысу энергиясы	313 кДж/моль

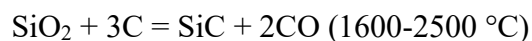
Синтез әдістері

Ачесон әдісі

SiC XIX ғасырдың соңында бір мезгілде бірнеше зерттеушілер - Шунцерберг, Муассон және Ачесон еңбектерінде алынған. Солардың ішінде Ачесон ұсынған әрі патенттеген әдіс қазіргі уақытта SiC өнеркәсіптік көлемде өндіруде кеңінен қолданылатын негізгі технология болып табылады [1].

Ачесон әдісінің мәні кремний диоксидін күлділігі аз көміртекті материалдармен араластырып, арнайы графитті электр пешінде жоғары температурада өндеуге негізделген. Пеш ішіндегі өзекше әдетте кокс кесектерінен дайындалып, электродтар арқылы электр тогы өткізіледі. Үрдіс барысында температура 2500-2600 °С аралығына дейін жетеді.

Жоғар температура әсерінен кремний диоксиді мен көміртегі арасында карботермиялық тотықсыздану реакциясы жүреді, оның нәтижесінде SiC мен көміртек тотығы түзіледі:



Аталған технология бойынша бір циклдің ұзақтығы шамамен 40 сағатты құрайды. Ачесон әдісінің негізгі кемшілігі алынатын өнім құрамында бөгде және ластаушы элементтердің салыстырмалы түрде жоғары мөлшерде болуы болып табылады. Осы себепті түзілген SiC кейбір жағдайларда өлшемі 10-15 мм-ге жететін монокристалды пластиналар түрінде алынғанымен, құрылымдық ақаулар мен қоспалардың көптігі оның жартылай өткізгіштік материал ретінде қолданылуын шектейді [2].

Соған қарамастан, Ачесон әдісімен алынған SiC абразивті материалдар өндірісінде кеңінен пайдаланылады, сондай-ақ Лели әдісі бойынша SiC кристалдарын өсіру кезінде бу фазасының көзі ретінде қолданыс табады.

Лели және ЛЭТИ әдістері

Сублимациялық кристалл өсіру технологияларының ішіндегі ең жетілдірілген әдістердің бірі - Лели әдісі болып табылады [3]. 1955 жылы Ян Энтони Лели алғаш рет жоғары тазалықтағы және сапалы SiC алу мүмкіндігін көрсетті. Бұл технология салқындатылған төсем бетінде алтыбұрышты құрылымға ие 6H-SiC политипінен тұратын қабыршақ тәрізді монокристалдардың түзілуіне мүмкіндік береді.

Лели әдісі алғаш рет аргон атмосферасында, графитті тигель ішінде шамамен 2500 °С температурада жүзеге асырылды. Алайда мұндай жоғары температуралық режим кристалдардың өсу аймағын шектеп, алынатын SiC кристалдарының өлшемін ұлғайтуға мүмкіндік бермеді. Соған қарамастан, осы әдіспен алынған кристалды SiC негізінде материалдың негізгі физикалық қасиеттерін, соның ішінде электрлік және оптикалық сипаттамаларын жан-жақты зерттеу мүмкін болды. Зерттеу нәтижелері SiC жанама тыйым салынған аймаққа ие жартылай өткізгіш екенін, радиациялық рекомбинация ықтималдығының төмендігін және тыйым салынған аймақ ені оның политиптік құрылымына тәуелді болатынын көрсетті. Дегенмен, кристалдардың шағын өлшемде түзілуіне байланысты Лели әдісі өнеркәсіптік немесе сериялық өндіріс үшін тиімсіз деп

есептеледі [4].

Бұл әдістің негізінде 2500-2650 °С температура аралығында поликристалды SiC-тің сублимациясы және оның температурасы төмен аймақта конденсациялануы арқылы кристалдардың өсуі жатыр. Әдетте, технологиялық үрдісте SiC алдын ала престеліп, втулка пішініне келтіріледі және көміртекті тигельге орналастырылады. Втулканың ішкі бетінің температурасы сыртқы қабырғасына қарағанда шамамен 50-70 °С төмен болады. Осындай температуралық градиенттің нәтижесінде SiC буы салқын аймақта конденсацияланып, кездейсоқ бағытталған монокристалдардың түзілуіне жағдай жасайды. Кристалдардың өсуі салыстырмалы түрде кең температуралық интервалда жүзеге асады [5].

Буды физикалық тасымалдау әдісі

Лели әдісін қолдану барысында кристалдардың өсуі кездейсоқ сипатқа ие болып, өсу үрдісін дәл бақылау мен реттеудің мүмкін еместігі салдарынан ұсақ өлшемді кристалдардың көп мөлшерде түзілуіне әкеледі. Аталған кемшілікті жою мақсатында кристалл өсуін бағыттауытын монокристалды «затравканы» пайдалану ұсынылды, бұл ірі өлшемді монокристалды кремний карбидін өсіруге мүмкіндік береді [6].

Бұл тәсіл алғаш рет 1979 жылы В.Ф. Цветков пен Ю.М. Таировтың еңбектерінде ұсынылып, Лели әдісінің жетілдірілген нұсқасы ретінде қалыптасты. Қазіргі уақытта бұл технология бу фазасының физикалық тасымалдануына негізделген әдіс (Physical Vapor Transport, PVT) деп аталады. Әдістің мәні сублимация нәтижесінде түзілген қаныққан SiC буын алдын ала дайындалған монокристалды «затравка» бетінде конденсациялау арқылы кристалл өсіру болып табылады.

Сублимациялық өсу үрдісіне бірқатар технологиялық параметрлер әсер етеді, олардың ішінде тигельдің конструкциясы мен ондағы температуралық өрістің таралуы аса маңызды болып саналады. Кристалдардың негізінен изотермиялық аймақтарда өсуге бейім болуы жылулық градиенттің дұрыс қалыптасуын шешуші факторға айналдырады.

Поликристалды SiC (шикізұрам) жоғары температуралы аймақта, әдетте 1800-2600 °С диапазонында орналасады. Ал температурасы салыстырмалы түрде төмен аймақта орналасқан монокристалды «затравка» бетіне бу фазасы тасымалданып, қанығу жағдайында кристалдану үрдісі жүреді. Осылайша кристалл өлшемін көпқабатты өсіру циклдарын қайталау арқылы біртіндеп ұлғайтуға мүмкіндік туады.

Өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез (SHS) және көлемдік жану (VCS) әдістері

SiC қатты фазада тотықсыздану арқылы алу технологияларының ішінде өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез (SHS) және көлемдік жану (VCS) әдістері кеңінен қолданылады. Екі жағдайда да бастапқы реагенттер қоспасы алдын ала қалыпталған дайындама түрінде дайындалады.

SHS әдісінде жану реакциясы бастапқыда шикізұрамның белгілі бір шектеулі бөлігінде тұтанып, содан кейін жылу бөлінуінің есебінен жану фронты дайындаманың қалған аймақтарына өздігінен таралады. Бұл үрдіс жоғары экзотермиялық әсерімен сипатталады және сыртқы энергия көзін минималды қолдануды талап етеді.

Ал көлемдік жану (VCS) әдісінде реакция басталмас бұрын бүкіл дайындама біртекті түрде қыздырылады, нәтижесінде химиялық түрлену материалдың барлық көлемінде бір мезгілде жүзеге асады. Аталған тәсіл, әдетте, экзотермиялық реакция кезінде бөлінетін жылу мөлшері салыстырмалы түрде төмен болған жағдайда қолданылады, ал жылу бөлінуі жоғары жүйелер үшін SHS әдісі анағұрлым тиімді болып саналады.

Жану негізіндегі технологиялар SiC бөлшектерін нанометрлік деңгейден миллиметрлік өлшемдерге дейінгі кең диапазонда алуға мүмкіндік береді. Дегенмен, жану үрдісінен кейін

алынған дисперсті SiC ұнтақтарын тазалау, ал кейбір жағдайларда қосымша механикалық ұнтақтау операцияларын жүргізу қажет болады [7].

SiC қолдану салалары

SiC жоғары қаттылық, термиялық тұрақтылық, химиялық инерттілік және электрлік қасиеттердің кең диапазонымен сипатталатын көпфункционалды материал болып табылады. Осы қасиеттерінің жиынтығы оны әртүрлі өнеркәсіп салаларында кеңінен қолдануға мүмкіндік береді [8].

Ең алдымен, SiC абразивті материал ретінде кең қолданыс тапқан. Оның Моос шкаласы бойынша қаттылығы жоғары болғандықтан, SiC негізіндегі абразивтер металл, керамика және композиттік материалдарды өңдеуде, тегістеу және кесу операцияларында пайдаланылады [9].

Жоғары балку температурасы мен тотығуға төзімділігі SiC отқа төзімді және құрылымдық материал ретінде қолдануға жол ашады. SiC негізіндегі бұйымдар металлургиялық пештерде, жоғары температуралы реакторларда, жылуалмастырғыштарда және агрессивті ортада жұмыс істейтін элементтерде кеңінен қолданылады [10].

SiC жартылай өткізгіш материал ретінде де ерекше маңызға ие. Кең тыйым салынған аймаққа, жоғары электр өрісіне төзімділікке және жылу өткізгіштікке ие болуы SiC жоғары қуатты, жоғары температуралы және жоғары жиілікті электрондық құрылғыларды жасауға қолайлы етеді. Осыған байланысты ол қуат электроникасында, радиотехникада және оптоэлектроникада перспективалы материал ретінде қарастырылады [11].

Сонымен қатар, SiC механикалық беріктігі мен тозуға төзімділігі арқасында қорғаныш жабындар, брондалған элементтер және үйкеліс түйіндерінде қолданылатын бөлшектер өндірісінде пайдаланылады. Биомедициналық салада оның биосәйкестілігі зерттеліп, имплантаттар мен сенсорлық құрылғыларда қолдану мүмкіндігі қарастырылуда.

SiC нарығына шолу

SiC нарығы өнім түрі, қолдану салалары және географиялық аймақтар бойынша сегменттелген. Өнім түрлері бойынша нарық жасыл SiC, қара SiC және басқа да кремний карбиді өнімдерін қамтиды.

Қолдану бағыттарына қарай SiC болат өндіруде, энергетика саласында, автомобиль өнеркәсібінде, аэроғарыш және қорғаныс өнеркәсібінде, электроника мен жартылай өткізгіштер өндірісінде, сондай-ақ өзге де салаларда пайдаланылады.

Географиялық тұрғыдан нарық Азия–Тынық мұхиты өңірі, Солтүстік Америка, Еуропа, Оңтүстік Америка, Таяу Шығыс және Африка аймақтарын қамтиды.

Есепте жоғарыда аталған барлық сегменттер бойынша кремний карбиді нарығының көлемі мен табыс көрсеткіштерінің болжамы АҚШ долларының миллион бірлігімен берілген.

Болжамдық деректерге сәйкес, әлемдік SiC нарығы 2021-2026 жылдар аралығында орташа жылдық өсім қарқыны 16%-дан жоғары деңгейде дамиды деп күтіледі.

SiC - кремний мен көміртегіден тұратын, жоғары қаттылығы мен отқа төзімділігімен ерекшеленетін қатты материал. Бұл қосылыс карборунд атауымен де белгілі және табиғатта өте сирек кездесетін муассанит минералы түрінде ғана ұшырасады.

SiC нарығы өнім түрлері, қолдану салалары және географиялық аймақтар бойынша жіктеледі. Өнімдік құрылымына қарай нарық жасыл SiC, қара SiC және өзге де өнім түрлерін қамтиды. Қолдану бағыттары бойынша SiC болат өндіруде, энергетика саласында, автомобиль жасау өнеркәсібінде, аэроғарыш және қорғаныс секторында, электроника мен жартылай өткізгіштер өндірісінде, сондай-ақ басқа да салаларда пайдаланылады.

Нарықтың негізгі үрдістері

Электроника және жартылай өткізгіштер сегментінде қолданудың артуы

SiC кремний мен көміртегіден тұратын жартылай өткізгіш материал болып табылады. SiC

түйіршіктерін біріктіру арқылы жоғары қаттылыққа ие керамикалық материалдар алуға болады, олар жоғары механикалық беріктік талап етілетін салаларда кеңінен қолданылады.

SiC өзінің жоғары температурада және жоғары кернеу жағдайында тұрақты жұмыс істеу қабілетімен, сондай-ақ ықшам өлшемді құрылғыларды жасауға мүмкіндік беруімен жартылай өткізгіштер өндірісінде ерекше маңызға ие. Осы қасиеттері оны қуатты электрондық компоненттер мен заманауи микросхемалар өндірісінде сұранысқа ие материалға айналдырды.

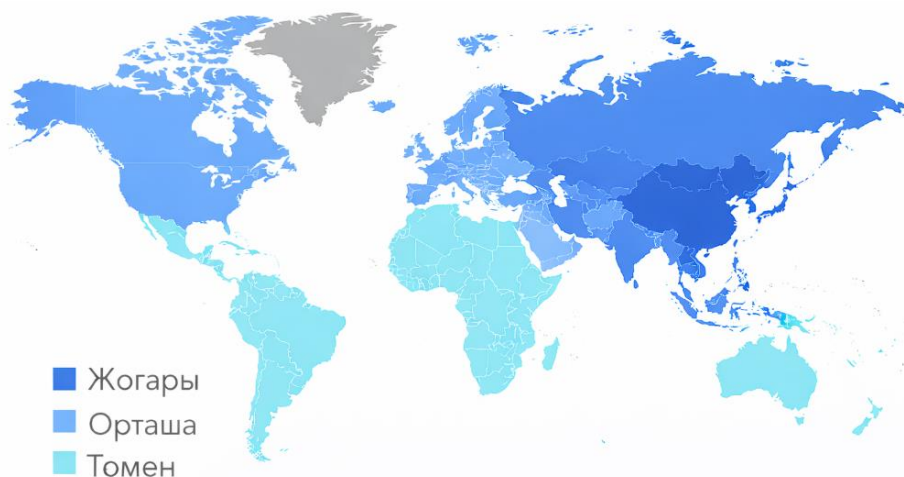
Жартылай өткізгіштер нарығының бірқатар сегменттерінде баяулау байқалғанына қарамастан, 2020 жылы бұл сала оң өсім көрсетті. Мұндай өсім деректерді өңдеу орталықтары мен тұрмыстық электроника өндірісіне деген сұраныстың артуымен байланысты болды, себебі көптеген сала қызметкерлері қашықтан жұмыс істеу форматына көшті. Жартылай өткізгіштер өнеркәсібі қауымдастығының (SiA) мәліметтеріне сәйкес, 2020 жылы әлемдік жартылай өткізгіштер нарығының сатылым көлемі 439,0 млрд АҚШ долларын құрап, 2019 жылмен салыстырғанда 6,5%-ға артқан. Сонымен қатар, 2020 жылғы желтоқсан айындағы жаһандық сатылым көлемі 39,2 млрд АҚШ долларына жетіп, 2019 жылғы желтоқсанмен салыстырғанда 8,3%-ға өскен.

Солтүстік Америкада, әсіресе Америка Құрама Штаттарында, электрондық өнеркәсіптің орташа қарқынмен дамуы күтілуде. Жаңа технологиялық өнімдерге деген сұраныстың артуы бұл нарықтың алдағы уақытта кеңеюіне ықпал етеді деп болжануда.

Еуропа аумағында Германия электрондық өнеркәсіп көлемі бойынша жетекші орынға ие және әлемде бесінші орында тұр. Елдегі электротехника және электроника саласы Германияның жалпы өнеркәсіптік өндірісінің шамамен 11%-ын және ішкі жалпы өнімінің (ЖІӨ) 3%-ға жуығын құрайды.

Ұлыбритания да Еуропадағы жоғары сапалы тұрмыстық электроника нарығында маңызды орын алады, мұнда шамамен 18 000 компания электрондық өнімдер өндірумен айналысады. Сонымен қатар, интеллектуалды тұрмыстық электроникаға деген жаһандық сұраныстың қарқынды өсуі SiC нарығының одан әрі дамуына қолайлы жағдай туғызуда.

Жоғарыда аталған факторларды ескере отырып, SiC нарығы болжамдық кезең ішінде қарқынды өсу қарқынын сақтайды деп күтіледі. SiC өндірісі бойынша нарықтық басым елдер мен аумақтар 1 суретте көрсетілген.



Сурет 1. SiC нарығындағы жетекші аймақтар

Болжамдық кезеңде SiC нарығында Азия-Тынық мұхиты өңірі жетекші орынға ие болады

деп күтіледі. Қытай, Үндістан және Жапония сияқты елдерде электроника, автомобиль жасау және қорғаныс өнеркәсібін қоса алғанда, әртүрлі салаларда озық әрі жаңартылған технологияларға деген сұраныстың артуы кремний карбидін тұтынудың өсуіне ықпал етуде.

Аталған өңір жартылай өткізгіштер нарығында да басымдыққа ие, бұл жағдайды мемлекеттік қолдау шаралары күшейте түсуде. Үкіметтік саясат пен стратегиялық бағдарламалардың арқасында болашақта кремний карбидіне деген сұраныстың одан әрі ұлғаюы күтіледі.

Қытай жартылай өткізгіштердің ірі тұтынушыларының бірі болып саналады және осы саладағы ішкі өндірісті арттыруға бағытталған белсенді саясат жүргізуде. 2019 жылы Қытай астанасы Бейжіңде жартылай өткізгіштер «Made in China 2025» мемлекеттік бағдарламасының басым бағыттарының бірі ретінде белгіленді. Бұл бастама қосылған құны жоғары өнімдер өндірісін ұлғайтуға бағытталған. Қытай 2025 жылға қарай өз қажеттілігіндегі жартылай өткізгіштердің шамамен 70%-ын ішкі өндіріс есебінен қамтамасыз етуді көздейді.

Үндістанда да жартылай өткізгіштер саласы қарқынды дамып келеді. Электроника және ақпараттық технологиялар департаментінің деректеріне сәйкес, елде жыл сайын 2000-нан астам жартылай өткізгіш микросхемалар әзірленеді. Өндіріс көлемінің артуы болашақта кремний карбиді нарығының кеңеюіне қолайлы жағдай туғызады.

Сонымен қатар, Үндістанның Электроника және жартылай өткізгіштер қауымдастығы (IESA) Сингапурдың Жартылай өткізгіштер өнеркәсібі қауымдастығымен (SSIA) электрондық және жартылай өткізгіштер салаларындағы сауда-техникалық ынтымақтастықты дамыту мақсатында өзара түсіністік туралы меморандумға қол қойды. Бұл әріптестік жартылай өткізгіштер өндірісіндегі инновациялық технологиялардың дамуына серпін беріп, Үндістанда кремний карбидін қолдану аясын одан әрі кеңейтуі мүмкін [12].

Жүргізілген әдеби шолу SiC синтез технологиялары, құрылымдық ерекшеліктері мен функционалдық қасиеттері оның қолдану аймақтарының кеңдігімен тікелей байланысты екенін көрсетті. Ачесон, Лели, PVT, SHS және көлемдік жану әдістерінің әрқайсысы алынатын өнімнің құрылымы, тазалығы және өлшемі бойынша ерекшеленеді, бұл SiC абразивті материалдардан бастап жоғары технологиялық жартылай өткізгіш құрылғыларға дейін пайдалануға мүмкіндік береді.

Соңғы жылдары SiC деген қызығушылықтың артуы оның жоғары температураға, электр өрісіне және агрессивті ортаға төзімділігімен қатар, энергия тиімділігін арттыруға мүмкіндік беретін қасиеттерімен түсіндіріледі. Әсіресе электроника мен жартылай өткізгіштер саласында SiC негізіндегі материалдардың маңызы артып, электр көліктері, жаңартылатын энергетика және қуат электроникасы бағыттарында кеңінен қолданылуда.

Сонымен қатар, нарықтық талдау нәтижелері SiC өндірісі мен тұтынуының географиялық тұрғыдан біркелкі емес екенін көрсетеді. Азия-Тынық мұхиты өңірі өндірістік көлемі мен тұтыну деңгейі бойынша жетекші орынға ие болса, Солтүстік Америка мен Еуропа жоғары қосылған құнды SiC негізіндегі технологияларды дамытуда маңызды рөл атқарады.

Қорытынды

SiC – бірегей физика-химиялық қасиеттерге ие, заманауи материалтану мен жоғары технологиялар үшін стратегиялық маңызы бар материал. Оны синтездеудің әртүрлі әдістерінің дамуы алынатын өнімнің құрылымын, тазалығын және функционалдық қасиеттерін басқаруға мүмкіндік беріп, кремний карбидін абразивті және отқа төзімді материалдардан бастап жоғары технологиялық жартылай өткізгіш құрылғыларға дейін кең ауқымда қолдануға жол ашады.

Жүргізілген шолу нәтижелері SiC деген жаһандық сұраныстың тұрақты түрде өсіп келе жатқанын көрсетеді. Әсіресе электроника, қуат электроникасы, электр көліктері, жаңартылатын энергетика және қорғаныс өнеркәсібі сияқты салаларда кремний карбиді негізіндегі

материалдардың маңызы жылдан-жылға артып отыр. Осыған байланысты SiC өндіруді жолға қою қазіргі заман талаптарына толық сәйкес келетін және экономикалық тұрғыдан негізделген бағыт болып табылады.

Сонымен қатар, SiC өндірісін дамыту импортқа тәуелділікті азайтып, жоғары қосылған құнды өнімдер шығаруға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде жаңа технологиялардың енгізілуіне, ғылыми-зерттеу жұмыстарын жандандыруға және білікті кадрлар даярлауға жағдай жасайды. Шикізаттық база мен ғылыми әлеуеттің болуы SiC өндірісін ұлттық деңгейде дамытуға нақты алғышарттар қалыптастырады.

Қорытындылай келе, SiC өндірісін қолға алу болашағы зор, стратегиялық тұрғыдан маңызды әрі ұзақ мерзімді перспективада өнеркәсіп пен жоғары технологиялар саласының тұрақты дамуына елеулі үлес қоса алатын бағыт болып табылады.

Әдебиеттер тізімі

1. Находнова А.В. и др. Применение рамановской спектроскопии для контроля температурных полей керны печи Ачесона //Спектроскопия комбинационного рассеяния света. – 2021. – С. 118-120.
2. Щербакова В.Б., Гринчук П. С. Термодинамическое моделирование формирования карбида кремния в процессе Ачесона в нестехиометрических смесях //Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2024. – Т. 69. – №. 2. – С. 106-113.
3. Авров Д.Д. и др. Сравнительный эллипсометрический анализ политипов карбида кремния 4 Н, 15 R, 6 Н, полученных модифицированным методом Лели в одном ростовом процессе //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 19. – С. 28-31.
4. Фадеев А.Ю., Лебедев А.О., Таиров Ю.М. О росте монокристаллов карбида кремния политипа 4Н на затравках с плоскостью (11 $\bar{1}$ 2) //Физика и техника полупроводников. – 2012. – Т. 46. – №. 10. – С. 1368-1373.
5. Ющенко Т.С., Брусиловский А.И. Методика создания адекватной PVT-модели природной газоконденсатной смеси //Газовая промышленность. – 2015. – №. 1. – С. 46-50.
6. Ющенко Т.С., Брусиловский А.И. Поэтапный подход к созданию и адаптации PVT-моделей пластовых углеводородных систем на основе уравнения состояния //Георесурсы. – 2022. – Т. 24. – №. 3. – С. 164-181.
7. Манашев И.Р. и др. Технология производства азотированных ферросплавов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза //Теория и технология металлургического производства. – 2019. – №. 4 (31). – С. 4-12.
8. Агеев О.А. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение. – 2010.
9. Перес Д. Э. Р., Носенко В.А., Данилов Д.В. Химическая подготовка карбида кремния для получения самосвязанного карбида кремния //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2016.
10. Носенко В. и др. Влияние способа измельчения на коэффициент формы зерен карбида кремния черного //Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2025. – Т. 27. – №. 3. – С. 108-121.
11. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету //Современная электроника. – 2009. – Т. 7. – С. 12.
12. «Кремний карбидін өндіру технологиясы» [Электрондық ресурс]. Қол жетімді: <https://ttvsif.at.ua/page17.html>, (қолжетімділік режимі: еркін). – Экрандағы атау. – Қол жеткізілген күні: 25.12.2025.

References

1. Nahodnova A. V. i dr. Primenenie ramanovskoj spektroskopii dlya kontrolya temperaturnyh polej kerna pechi Achesona //Spektroskopiya kombinacionnogo rasseyaniya sveta. – 2021. – S. 118-120.
2. SHCHerbakova V. B., Grinchuk P. S. Termodinamicheskoe modelirovanie formirovaniya karbida kremniya v processe Achesona v nestekhiometricheskikh smesyah //Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk. – 2024. – T. 69. – №. 2. – S. 106-113.
3. Avrov D. D. i dr. Sravnitel'nyj ellipsometricheskij analiz politipov karbida kremniya 4 H, 15 R, 6 H, poluchennyh modifitsirovannym metodom Leli v odnom rostovom processe //Pis'ma v ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. – 2020. – T. 46. – №. 19. – S. 28-31.
4. Fadeev A. YU., Lebedev A. O., Tairov YU. M. O roste monokristallov karbida kremniya politipa 4H na zatravkah s ploskost'yu (11\bar{2}2) //Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2012. – T. 46. – №. 10. – S. 1368-1373.
5. YUshchenko T. S., Brusilovskij A. I. Metodika sozdaniya adekvatnoj PVT-modeli prirodnoj gazokondensatnoj smesi //Gazovaya promyshlennost'. – 2015. – №. 1. – S. 46-50.
6. YUshchenko T. S., Brusilovskij A. I. Poetapnyj podhod k sozdaniyu i adaptacii PVT-modelej plastovyh uglevodorodnyh sistem na osnove uravneniya sostoyaniya //Georesursy. – 2022. – T. 24. – №. 3. – S. 164-181.
7. Manashev I. R. i dr. Tekhnologiya proizvodstva azotirovannyh ferrosplavov metodom samorasprostranyayushchegosya vysokotemperaturnogo sinteza //Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. – 2019. – №. 4 (31). – S. 4-12.
8. Ageev O. A. i dr. Karbid kremniya: tekhnologiya, svoystva, primeneniye. – 2010.
9. Peres D. E. R., Nosenko V. A., Danilov D. V. Himicheskaya podgotovka karbida kremniya dlya polucheniya samosvyazannogo karbida kremniya //Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2016.
10. Nosenko V. i dr. Vliyanie sposoba izmel'cheniya na koeffitsient formy zeren karbida kremniya chernogo //Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty. – 2025. – T. 27. – №. 3. – S. 108-121.
11. Luchinin V., Tairov YU. Otechestvennyj poluprovodnikovyy karbid kremniya: shag k paritetu //Sovremennaya elektronika. – 2009. – T. 7. – S. 12.
12. «Kremni karbidın öndırıu tehnologiasy» [Elektrondyq resurs]. Qol jetımdı: <https://ttvsif.at.ua/page17.html>, (qoljetımdılık rejımı: erkın). – Ekrandaǵy atau. – Qol jetkızılgen kúnı: 25.12.2025.

КАРБИД КРЕМНИЯ: ОБЗОР МЕТОДОВ СИНТЕЗА, СВОЙСТВ, ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ И РЫНКА

БУРУМБАЕВ А.Г. 

Бурумбаев Азамат Галимжанович – Докторант 3-го курса, магистр технических наук, младший научный сотрудник, Химико-металлургический институт имени Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

E-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Аннотация. Данная статья посвящена карбиду кремния (SiC) и направлена на проведение комплексного научного обзора его методов синтеза, физико-химических свойств, областей применения, а также тенденций развития мирового рынка. В работе рассмотрены основные промышленные и лабораторные технологии получения SiC, включая классический метод Ачесона, метод Лели и его модифицированную версию физического транспорта в паровой фазе (PVT), самораспространяющийся высокотемпературный синтез (SHS), а также методы объемного горения. Для каждого способа синтеза выполнен сравнительный анализ технологических особенностей, энергоёмкости процессов, структурно-морфологических характеристик получаемого продукта, степени чистоты и

возможностей практического применения.

Показано, что высокая твердость, термическая и химическая устойчивость, износостойкость, а также уникальные электрические свойства карбида кремния как широкозонного полупроводника обеспечивают его широкое применение в абразивных материалах, огнеупорной керамике, силовой электронике, автомобильной, энергетической и аэрокосмической промышленности. Кроме того, проанализирована структура мирового рынка SiC по видам продукции, областям применения и географическим регионам, при этом особо отмечена ведущая роль Азиатско-Тихоокеанского региона.

В статье обоснована стратегическая значимость развития производства карбида кремния и показано, что данный материал обладает высоким потенциалом как функциональный продукт с высокой добавленной стоимостью. Представленные результаты обзора могут быть полезны для дальнейшего развития научных исследований и промышленных проектов в области синтеза, модификации свойств и практического применения SiC.

Ключевые слова: карбид кремния, SiC, методы синтеза, метод Ачесона, PVT, SHS, полупроводники, обзор рынка.

SILICON CARBIDE: A REVIEW OF SYNTHESIS METHODS, PROPERTIES, APPLICATIONS, AND MARKET

BURUMBAYEV A.G. 

Burumbayev Azamat Galymzhanovich – 3rd year doctoral student, master of engineering sciences, junior researcher, Zh. Abishev chemical-metallurgical institute, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: burumbayev.azamat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5276-2259>

Abstract. This article is devoted to silicon carbide (SiC) and aims to provide a comprehensive scientific review of its synthesis methods, physicochemical properties, application fields, and trends in the development of the global market. The paper considers the main industrial and laboratory technologies for SiC production, including the classical Acheson process, the Lely method and its modified physical vapor transport (PVT) version, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), as well as volumetric combustion methods. For each synthesis approach, a comparative analysis of technological features, process energy consumption, structural and morphological characteristics of the obtained products, purity level, and practical application potential is carried out.

It is shown that the high hardness, thermal and chemical stability, wear resistance, as well as the unique electrical properties of silicon carbide as a wide-bandgap semiconductor ensure its widespread use in abrasive materials, refractory ceramics, power electronics, and the automotive, energy, and aerospace industries. In addition, the structure of the global SiC market is analyzed in terms of product types, application sectors, and geographical regions, with the leading role of the Asia-Pacific region being particularly emphasized.

The article substantiates the strategic importance of developing silicon carbide production and demonstrates that this material has high potential as a functional product with high added value. The presented review results may be useful for the further development of scientific research and industrial projects in the fields of SiC synthesis, property modification, and practical application.

Key words: silicon carbide, SiC, synthesis methods, Acheson method, PVT, SHS, semiconductors, market review.