Карботермический синтез нанопорошков карбида кремния с использованием микрокремнезема

Б.М. Абдурахманов[1], М.Ш. Курбанов[1], У.М. Нуралиев[*,1], В.М. Ротштейн[1], У.Н. Рузиев[2]

[1]Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, ул. Дурмон йули 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]НПО по производству редких металлов и твердых сплавов Алмалыкского ГМК, ул. Хайдарова 1, 111709, Чирчик, Узбекистан

Получена 16.02. 2021

* Corresponding author: e-mail u.nuraliyev@mail.ru, Phone: +998 97 703 37 85

Карботермическим восстановлением микрокремнезема, представляющего собой высокодисперсные техногенные отходы производства технического кремния и ферросилиция, содержащего 95-97 масс.% аморфной двуокиси кремния, синтезированы микро и нанопорошки карбида кремния. Показано, что этим путем могут быть синтезированы 4H, 6H и 3C политипы карбида кремния. Установлено, что размер синтезированных частиц карбида кремния зависит от размеров частиц используемого углеродистого восстановителя.

Ключевые слова: синтез, карбид кремния, микрокремнезем, микро-и нанопорошки, политипы карбида кремния, размеры частиц.

By carbothermic reduction of microsilica, which is a highly dispersed technogenic waste from the production of technical silicon and ferrosilicon, containing 95-97 wt.% amorphous silicon dioxide, micro- and nanopowders of silicon carbide have been synthesized. It is shown that by this way 4H, 6H and 3C polytypes of silicon carbide can be synthesized. It has been established that the size of the synthesized silicon carbide particles depends on the particle size of the used carbonaceous reducing agent.

Key words: synthesis, silicon carbide, microsilica, micro- and nanopowders, silicon carbide polytypes, particle sizes.

I. Введение

Карбид кремния (SiC) обладает широким спектром полезных физико-химических свойств, таких как: высокая твердость и прочность, низкая плотность, термическая и химическая стойкость. Благодаря этому SiC имеет широкий спектр применения в различных областях науки и отраслях промышленности. Так, наряду с использованием в многофункциональных керамических изделиях, одной из важнейших сфер применения SiC является его использование в качестве широкозонного полупроводника в электронике, особенно востребованного в силовой электронике, ввиду работоспособности электронных приборов на основе карбида кремния при более высоких температурах и мощностях, чем приборы, изготовленные на основе кремния.

В этой связи первоочередной интерес представляют работы, направленные на развитие

и освоение передовых технологий получения SiC, особенно в части синтеза микро- и наноразмерных порошков этого материала, поскольку такие порошки используются в качестве упрочняющей фазы в различных покрытиях и являются компонентами конструкционной керамики и других материалов, потребляемых в ответственных изделиях оборонной и космической техники.

Для синтеза микро и наноразмерных порошков SiC используются плазменные процессы [1-3], микроволновой нагрев [4, 5], карботермическое восстановление кремнезема (SiO_2) [6], химическое осаждение из газовой фазы [7], золь-гель метод [8] и другие, которые подробно описаны в [9, 10].

В последнее время для синтеза высокодисперсных порошков карбида кремния ведутся исследования с использованием микрокремнезема (МКЗ) [11, 12]. МКЗ, известный в литературе также как микросилика, высокодисперсная двуокись кремния или силикатный дым, является, наряду с газообразной двуокисью углерода (CO_2), одним из главных видов техногенных отходов карботермического электродугового производства технического кремния и ферросилиция. Благодаря высокой дисперсности и соответственно большой удельной поверхности частиц и высокому содержанию в них SiO_2, составляющему 95–97 масс.%, МКЗ используется в качестве добавок для улучшения свойств бетонов, так как позволяет увеличить их прочность на сжатие, износо- и морозосостойкость [13].

Одним из важных и новых направлений применения МКЗ является его возврат в составе брикетов в основное производство рядовых марок технического кремния и практически любых марок ферросилиция [14, 15], что повышает рентабельность и улучшает экологические показатели этих производств. Показано также, что использование микрокремнезема для синтеза порошков SiC позволяет уменьшить стоимость производства и открывает перспективы для управляемого регулирования электрофизических характеристик этого продукта [16].

В настоящей работе приведены результаты исследования карботермического восстановления МКЗ для синтеза микро- и нанопорошков карбида кремния с применением двух видов углеродистого восстановителя.

II. Эксперимент и материалы

В качестве кремнезёмного сырья использован МКЗ, представляющий собой техногенные отходы производства ферросилиция АО «Узбекский металлургический комбинат». Использованный микрокремнезем содержит 95–97 масс.% SiO_2 с размерами аморфных частиц-глобул от ~10–20 нм до 250 нм. Как и МКЗ других производителей технического кремния и ферросилиция [13], микрокремнезем, применен-ный нами, обнаруживает склонность к слипанию отдельных мелких частиц с образованием комплексов, внешне напоминающих виноград-ные гроздья микрометрических размеров, в составе которых объединены десятки и сотни мелких частиц МКЗ с размерами ~10–40 нм [17].

В экспериментах были использованы два типа углеродистого восстановителя:

а) нефтяной кокс с содержанием твердого углерода C(s) ≥90.0%, золы – не более 0.7% и влаги – 1.5–2.0%, намеренно измельченный до размеров частиц 0.5–1.0 мм;

б) технический углерод (сажа) марки К-354 с размерами частиц 10–200 мкм и содержанием C(s)≥95.0%.

Для синтеза карбида кремния использовали печь сопротивления марки GAN-150x130/1500/2500-S (LinnHighTherm). Синтез осуществляли постепенным и поэтапным увеличением температуры от 700 до 1950°C с выдержкой 3 часа при 700, 1600 и 2000°C.

Фазовый состав SiC определяли на автоматизированном рентгеновском дифрактометре XRD-6100 (Shimadzu). Для получения рентгеновских спектров использовали CuKα-излучение с постоянной скоростью вращения детектора 4 град/мин с шагом 0.02 град в интервале углов 2θ.

Спектры комбинационного рассеяния исследовали с помощью InViaRaman спектрометра (Renishaw) с применением источника возбуждения Cobolt CW 532 nm DPSS лазер с длиной волны излучения λ=532 нм и Spectrum Stabilized Laser Module с λ=785 нм. В процессе измерений лазерный луч фокусировали на поверхность образцов в пятно диаметром 10 мкм. Объектив с увеличением ×50 использовали для фокусировки возбуждающего света, время экспозиции составляло 10 с. Измерения проводили на различных участках поверхности

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

образцов SiC, представляющей собой плоскую площадку с линейными размерами 20×20 мм.

Для изучения морфологии и размеров частиц использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ). Поскольку высокодисперсным частицам SiC свойственно слипаться друг с другом, как это наблюдается у МКЗ, и образовывать агломераты, для точного определения размеров частиц синтезированных порошков SiC и их распределения по размерам использовали методику, основанную на создании водной наносуспензии с последующим ее просвечиванием с применением лазерного анализатора Nano-SightLM10 (Malvern Panalytical**,** Great Britain). Для этого сначала агломераты частиц SiC подвергали диспергированию ультразвуковыми волнами частотой 40 кГц в водной среде, а затем проводили оценку размеров отдельных частиц.

III. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены рентгенограммы порошков SiC, полученных карботермическим восстановлением МКЗ с использованием упомянутых выше углеродистых восстановителей, то есть, нефтяного кокса (*a*) и технического углерода в виде сажи (*b*).

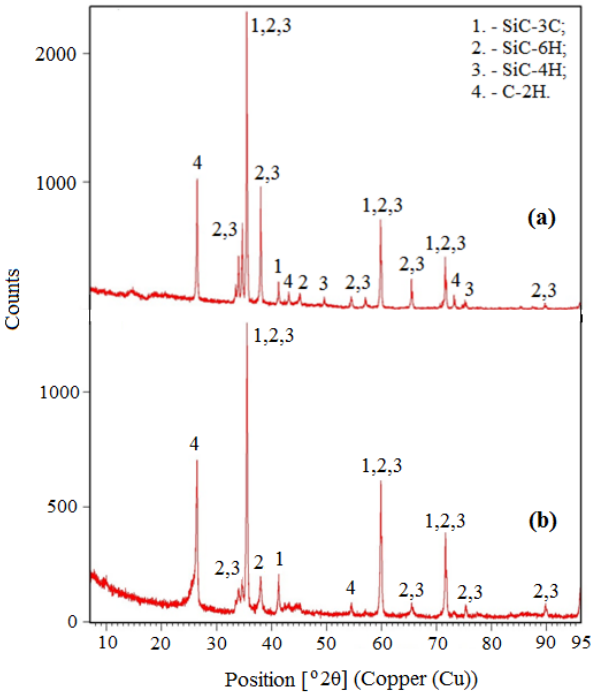


Рисунок 1. Рентгенограмма синтеза порошков карбида кремния из микрокремнезема, полученных с использованием *a*) нефтяного кокса, *b*) технического углерода (сажи).

Положение рентгеновских пиков карбида кремния, синтезированного из микрокремнезема, и наличие графитового пика в 26, 341 (рис. 1) согласуется с данными [18, 19]. Так, наличие пика, соответствующего графиту, обычно обусловлено избытком углерода в исходной шихте, что, отнюдь, не снижает качества продукта, но зато гарантированно обеспечивает полноту восстановления SiO_2 с образованием SiC.

Образование SiC начинается при $T \geq 1500$ K после плавления, испарения и диссоциации SiO_2 с образованием летучего монооксида кремния, (SiO_g), который взаимодействует с твердым углеродистым восстановителем C(s) по реакции:

$$SiO(g) + C(s) = SiC(s) + CO(g).$$

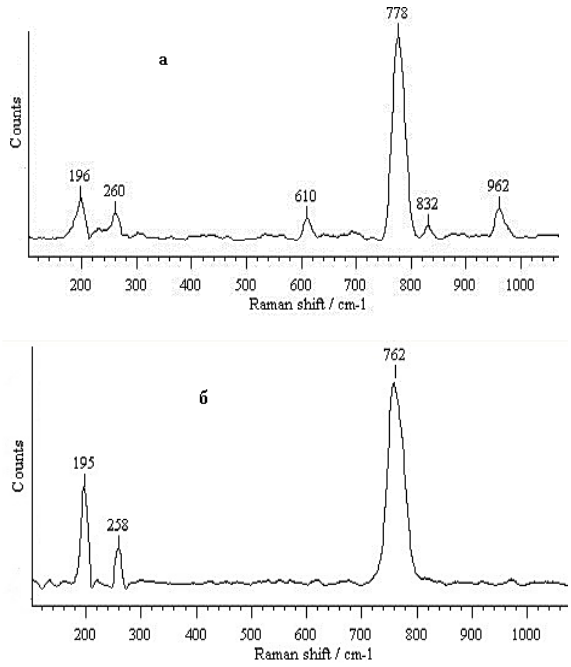
Постоянное удаление из печи образующейся газообразной моноокиси углерода, CO(g), и обеспечение избытка углерода на уровне, несколько превышающем стехиометрическое соотношение, смещают равновесие указанной реакции в сторону преимущественного образования SiC. Обнаружено, что на кинетику взаимодействия кремния с углеродом положительно влияет также операция предварительной активационной обработки нефтяного кокса.

Известно, что SiC может иметь различную кристаллическую структуру – кубическую β-SiC (3C-SiC), стабильную примерно до 2300 K, а также гексагональную и ромбоэдрическую α-SiC структуру (2H-SiC, 4H-SiC, 6H-SiC и 15 R, 21 R и др.), стабильную при более высоких температурах [20].

Приведенная на рис. 1 рентгенограмма свидетельствует об образовании кубического 3C, гексагонального 4H и 6H политипов, представляющих интерес среди существующих более 200 политипов карбида кремния. Наибольший практический интерес представляют политипы 4H, 6H и 3C, которые встречаются наиболее часто и могут быть воспроизводимо получены в виде слитков или эпитаксиальных слоев. В настоящее время промышленным способом выращиваются монокристаллические слитки всего двух политипных модификаций 4H и 6H [21]. Как свидетельствуют результаты рентгено-дифракционного анализа, именно политипы 4H, 6H и 3C карбида кремния могут быть синтезированы из МКЗ в виде высокодисперсных порошков.

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

Необходимо отметить, что разные модификации кристаллов SiC мало отличаются по значениям многих параметров, так как фактически представляют собой одинаковые слои кремния и углерода, только составленные в несколько отличном порядке, что затрудняет их идентификацию по политипу. Эти трудности преодолеваются при использовании метода комбинационного рассеяния, который позволяет, за счет своей чувствительности к длительности кратных периодов в кристаллической решетке, четко фиксировать и различать линии, соответствующие определенному политипу монокристаллов SiC. Следует также отметить, что метод комбинационного рассеяния позволяет выявить наличие даже малых включений политипов карбида кремния в исследуемых образцах.



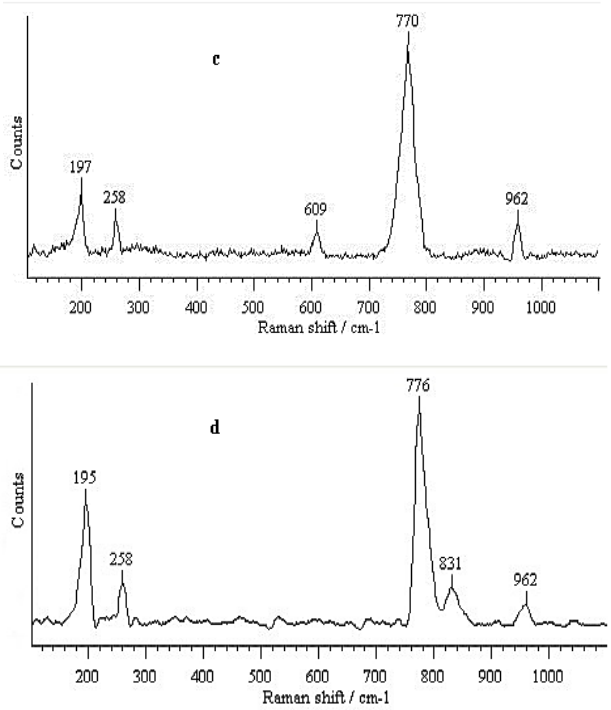


Рисунок 2. Спектры комбинационного рассеяния четырех участков синтезированных порошков карбида кремния, полученные с использованием CoboltCW 532 nm DPSS лазера (λ=532 нм).

На рис. 2 представлены спектры комбинационного рассеяния, полученные нами для отдельных четырех участков исследуемой поверхности синтезированных частиц SiC с использованием CoboltCW 532 nm DPSS лазера (λ=532 нм).

Для определения принадлежности полученных нами спектров SiC к тому или иному политипу была использована сводная информация положений линий в спектрах комбинационного рассеяния SiC различных политипов, приведенная в таблице [22].

Таблица. Положения линий в спектрах комбинационного рассеяния карбида кремния различных политипов (в cm^{-1}). (Ссылки в заголовках столбцов относятся к тем данным столбца, около которых ссылка на источник не указывается).

Колебательная мода	Политип SiC			
	3C [25]	4H [23, 24]	6H [23, 24]	15R [23, 24]
TA		196,204,266	145, 149, 236, 241, 262, (266 [25])	167, 172, 254, 256
LA		610	504, 508, (514 [25])	331, 337, 569, 577
TO	796	776, 796 [25]	766, 769, 777, 788, 797 [25]	769, 785, 797 [25]
LO	972	838, 964 [25]	889, 965 [25]	860, 932, 938, 956

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

На рис. 3 представлены спектры комбинационного рассеяния образов SiC, полученные нами с использованием Spectrum Stabilized Laser Modulena λ=785 нм.

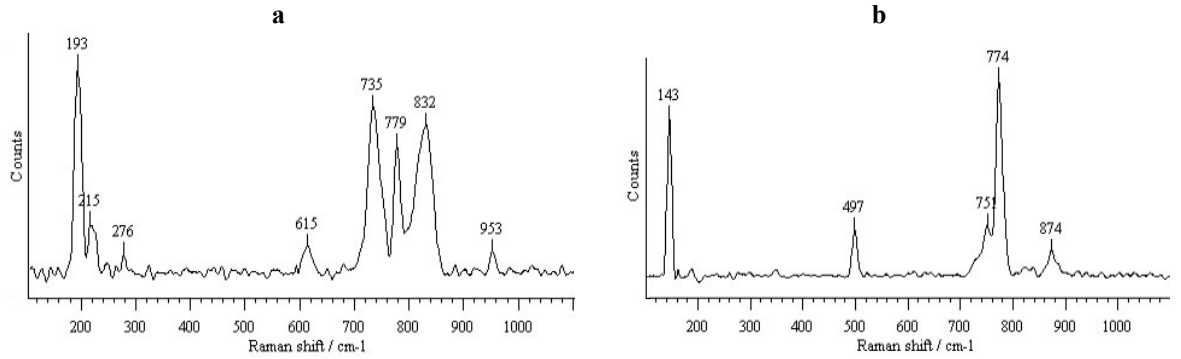


Рисунок 3. Спектры комбинационного рассеяния образов SiC, полученные с использованием 785 nm Spectrum Stabilized Laser Module лазера (λ=785 нм).

Анализ показал, что спектры, представленные на рис. 2 и рис. 3(a), хорошо согласуются с данными, соответствующими монокристаллическому карбиду кремния 4H политипа, приведенными в таблице, в то время как спектр, изображенный на рис. 3(b), следует отнести к спектру монокристаллического карбида кремния 6H политипа. Полученный результат можно объснить тем, что нагревание β-формы до температур свыше 1700°C приводит к постепенному переходу кубической β-формы в гексагональную (2H, 4H, 6H, 8H) и ромбическую (15R).

На рис. 4 показано типичное СЭМ изображение группы частиц порошка SiC. Видно, что частицы порошка карбида кремния имеют неправильную форму, близкую к «осколочной», с гладкой поверхностью, на которой практически отсутствуют признаки «шершавости» поверхности частиц.

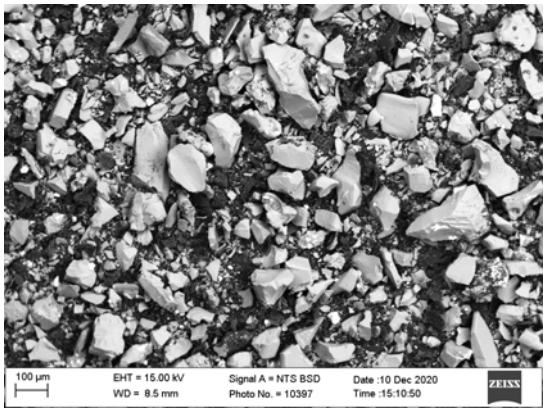


Рисунок 4. СЭМ изображение синтезированных порошков карбида кремния.

Основная масса частиц имеет размеры намного меньше 100 мкм, в то же время видны и отдельные крупные частицы, имеющие размеры 100–200 мкм, их число не превышает ~10% от общего количества частиц. Эти крупные частицы могут быть результатом высокотемпературной агломерации нескольких более мелких частиц

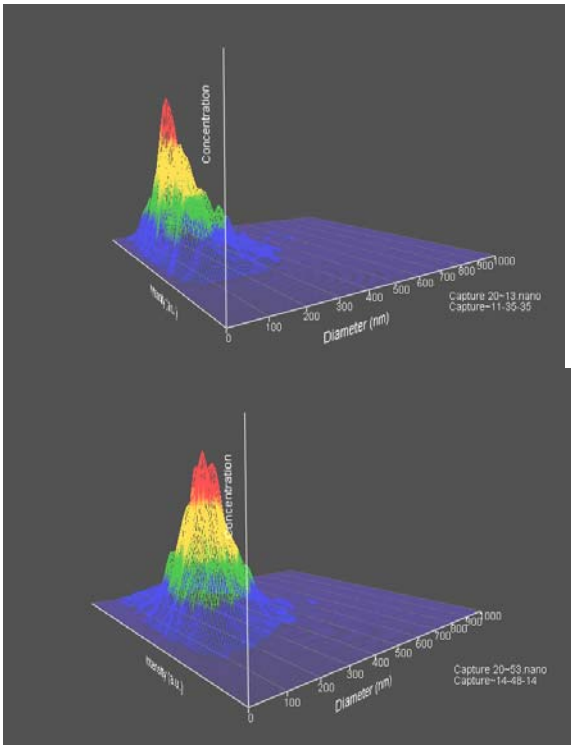


Рисунок 5. Трехмерное распределение частиц SiC по размерам при использовании: нефтяного кокса (верхний снимок); технического углерода (сажа) (нижний снимок).

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

или группы наночастиц. Подтверждением этому являются результаты оценки трехмерного распределения частиц синтезированных порошков SiC по размерам, полученные с помощью Nano Sight LM10 (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что синтезированные частицы имеют размеры в довольно широком диапазоне, 30–400 нм. При этом распределение частиц по размерам имеет особенности, связанные с различием размеров использованного углеродистого восстановителя.

Так, минимальный размер частиц SiC, полученных при использовании нефтяного кокса составляет ~30 нм, и кривая распределения по размерам демонстрирует резкий подъем и медленный спад с наличием участка, на котором отмечается наибольшая концентрация частиц с размером в диапазоне 100–200 нм;

При использовании в качестве углеродистого восстановителя технического углерода в виде сажи, частицы которой имеют наноразмеры минимум на порядок мельче частиц размолотого нефтяного кокса, наблюдается заметный сдвиг размеров частиц SiC в большую сторону, т.е. минимальный размер частиц синтезированного карбида кремния составляет ~80–90 нм, а распределение частиц по размерам близко к нормальному с наибольшим количеством частиц, имеющих размер в диапазоне 150–350 нм.

Как видно, размеры частиц синтезированных порошков SiC из микрокремнезема имеют достаточно большой диапазон. В [5] путем карботермического восстановления SiO_2 под действием микроволнового излучения при быстром нагреве были синтезированы нанопорошки карбида кремния β-SiC модификации. Быстрый микроволновой нагрев позволил получить, при оптимальных условиях синтеза, наноразмерные частицы размером от 10 до 40 нм, в основном кубический SiC (β-SiC). В работе [26] показано, что предварительное кратковременное измельчение исходной смеси в шаровой мельнице и прямой самораспространяющийся высокотемпературный синтез порошков SiC позволяет получить нанопорошки размером частиц 50–200 нм.

Очевидно, что свойства нанопорошков SiC, в том числе и размер частиц, зависят от применяемого способа синтеза и используемых исходных материалов. Как показали результаты наших экспериментов, карботермическое восстановление высокодисперсного МКЗ в резистивной печи позволяет синтезировать как кубическую β-SiC (3C-SiC), так и гексагональную α-SiC-структуру (4H-SiC, 6H-SiC). При этом размер синтезируемых частиц может быть урегулирован размером частиц исходной смеси.

Таким образом, из приведенных экспериментальных данных следует, что размер частиц порошков SiC и их гранулометрический состав зависят от размеров частиц применяемых углеродистых восстановителей. Соотношение размеров частиц кремнезема и углеродистого восстановителя, а также, как показано в наших экспериментах, абсолютные размеры частиц углеродистого восстановителя влияют на скорость реакции углерода с SiO_2 и, следовательно, на кинетику образования SiC, а наблюдаемое различие гранулометрического состава частиц карбида кремния является следствием этого процесса.

Полученный порошок карбида кремния относится к классу смесей нано- и микропорошков, которые востребованы в различных областях практического применения и по своим стоимостным показателям превышают цены на технический кремний и ферросилиций, отходы производства которых используются в качестве сырья для их получения. Это обстоятельство указывает на целесообразность сочетания выплавки технического кремния или ферросилиция с печным синтезом карбида кремния на одном предприятии. Необходимо отметить, что некондиционная продукция печного синтеза SiC, в свою очередь, может быть успешно использована при электродуговой выплавке элитных марок технического кремния при гарантированном снижении удельных энергозатрат.

IV. Заключение

Карботермическим восстановлением в печи сопротивления высокодисперсного микрокремнезема, представляющего собой техногенные отходы производства технического кремния и ферросилиция, получены нано- и микропорошки карбида кремния.

На основе анализа спектров рентгеновского дифрактометра и комбинационного рассеяния полученных порошков показано, что из микрокремнезема могут быть синтезированы 4H, 6H и 3C политипы карбида кремния.

Установлена роль «размерного эффекта», согласно которому распределение синтези-

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

рованных частиц по размерам зависит от размеров частиц использованного углеродистого восстановителя.

Благодарность. Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику Института ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз К. Эгамбердиеву за помощь в проведении измерений размеров частиц карбида кремния.

Метаданные

Carbothermic synthesis of the silicon carbide nanopowders with using microsilica

B.M. Abdurakhmanov[1], M.Sh. Kurbanov[1], U.M. Nuraliev[1], V.M. Rothstein[1], U.N. Ruziev[2]

[1]Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbek Academy of Sciences, Durmon Yoli st., 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan
[2]NPO po proizvodstvu redkikh i tverdykh splavov Almalykskogo GMK, Khaidarov st., 1, 111709, Chirchik, Uzbekistan

By carbothermic reduction of microsilica, which is a highly dispersed technogenic waste from the production of technical silicon and ferrosilicon, containing 95-97 wt.% amorphous silicon dioxide, micro- and nanopowders of silicon carbide have been synthesized. It is shown that by this way 4H, 6H and 3C polytypes of silicon carbide can be synthesized. It has been established that the size of the synthesized silicon carbide particles depends on the particle size of the used carbonaceous reducing agent.

Keywords: synthesis, silicon carbide, microsilica, micro- and nanopowders, silicon carbide polytypes, particle sizes.

Литература (References)

[1] P. Rai, Y.S. Kim, S.K. Kang, Y.T. Yu. Synthesis of nanosized silicon carbide through nontransferred arc thermal plasma. Chem Process **32**, 211-218 (2012).
[2] J.H. Van Laar, I.J. Vander Walt, H. Bissett, G.J. Puts, P.L. Crouse. Synthesis and deposition of silicon carbide nanopowders in a microwave-induced plasma operating at low to atmospheric pressures. Metall. **115**, No.10, 949-955 (2015).
[3] V.V. Rudneva. Ossobennosti karbidoobrazovaniya v plazmometallurgicheskom reaktore. Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekctii RAEN. Otdelenie metallurgii. No.16, 75-81 (2006).
[4] T. Ebadzadeh, E. Marzban-Rad. Materials characterization. Microwave hybrid synthesis of silicon carbide nanopowders. Materials Characterization **60**, 69-72 (2009).
[5] B.M. Moshtaghioun, R. Poyato, F.L. Cumbrer, S. Bernardi-Martin, A. Monshi, M.H. Abbasi, F. Karimzadeh, A. Dominguez-Rodriguez. Rapid carbothermic synthesis of silicon carbide nanopowders by using microwave heating. Journal of the European Ceramic Society **32**, No.8, 1787-1794 (2012).
[6] V.A. Borodulya, L.M. Vinogradov, A.Zh. Greben'kov, A.A. Mikhailov. Syntez karbida kremniya v electrothermicheskom reaktore s kipyashim sloem uglerodnikh chastict. Gorenie i plazmokhimiy **13**, No.2, 92-102 (2015).
[7] X. Qiang, H. Li, Y. Zhang, S. Tian, J. Wei. Mater. Lett. **107**, 315-317 (2013).
[8] H. Chen, J. Jiang, H. Zhao. Synthesis of highly dispersed silicon carbide powders by a solvothermal-assisted sol-gel process. Applied Physics A **124**, No.470, 245-253 (2018).
[9] M.A. Hafiz, M. Sohor, M. Mustapha, J.C. Kurnia. Silicon carbide from synthesis to application: a review. MATEC Web of Conferences **131**, 04003 (2017).
[10] H. Abderrazak, E. Hmida. Silicon carbide: synthesis and sroperties. In book: Properties and Applications of Silicon-Carbide. Ed. by R. Gerhard, pp. 381-388 (2011).
[11] Y. Zhong, L.L. Shaw, M. Manjarres, M.F. Zawrahy. Synthesis of silicon carbide nanopowder. Using Silica Fume. J. Am. Ceram. Soc. **93**, No.10, 3159-3167 (2010).
[12] O.A. Polyakh, V.V. Rudneva, N.F. Yakushevich, G.V. Galevsky, A.E. Anikin. Primenenie tekhnogennikh otkhodov metallurgicheskikh predpriyatiy dlya proizvodstva carbide kremniya. Izvestiya vyssiikh uchebnikh zavedeniy. Chernaya metallurgiya **57**, No.8, 5-12 (2014).
[13] N.A. Lokhova, I.A. Makarova, S.V. Partmanskaya. Obzhigovoi materiali na osnove mikrosilica. (Bratsk, Br.GTU, 2002.
[14] M.Sh. Kurbanov, B.M. Abdurakhmanov, H.B. Ashurov. Applied Solar Energy **54**, No.2, 85-90 (2018).
[15] B.M. Abdurakhmanov, Kh.B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov. Patent RUz 1AP № 05998. Sposob opredeleniya optimal'nogo kolichestva microsilica v kremnezemnoy chasti briketiruemoy shikhty dlya viplavki tekhnicheskogo kremniya ili ferrosilitciya Prioritet 27.07.2017. VAK RUz 2019,№10, c.105.
[16] B.M. Abdurakhmanov, Kh.B. Ashurov, M.Sh. Kurbanov. Khimiko-metallurgicheskiy peredel kremnezema v monosilanovoe syr'e dlya solnechnoy energetiki i nanoelectronici. (Tashkent, Navroz, 2018).
[17] M.Sh. Kurbanov, U.M., Nuraliev, S.S. Kurbanov. Ispol'zovanie microsilica v tekhnologii polucheniya kremniya i ferrosilitciya. Khimiya i khimicheskie tekhnologii No.1, 8-12 (2018).
[18] J. Aguilar, J. Rodriguez, M. Hinojosa. Microwaves as an energy source for producing β-SiC. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy **36**, No.3, 169-177 (2016).
[19] A.L. Ortiz, F. Sanchez-Bajo, F.L. Cumbrera, F. Guiberteau. X-ray powder diffraction analysis of a silicon carbide-based ceramic. Materials Letters **49**, 137-145 (2001).
[20] E.N. Agalyamova, E.A. Belenkov, V.A. Greshnyakov. Structura polymorphnikh raznovidnostey karbida kremniya. Vestnik Chelyabinskogo gosuniversiteta. No.15(230), 15-24 (2011).
[21] D.D. Avrov, A.O. Lebedev, Yu.M. Tairov. Politipnie vkluchenia i politipnaya stabil'nost' kristallov carbida kremniya. Fizika I tekhnika poluprovodnikov (FTP) **50**, No.4, 501-508 (2016).

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.

[22] I.G. Aksyanov, M.E. Kompan, I.V. Kul'kov. Fizika tverdogo tela (FTT) **52**, No.9, 1724-1728 (2010).
[23] L.M. Sorokin, N.V. Veselov, M.V. Sheglov, A.E. Kalmykov, A.A. Sitnikova, N.A. Feoktistov, A.V. Osipov, S.A. Kukushkin. Pis'ma v ZhTF **34**, No.22, 88-91 (2008).
[24] M.E. Kompan, I.G. Aksyanov: V.I. Kulkova, V.A. Kukushkin, A.V. Osipov, N.A. Feoktistov. Fizika tverdogo tela (FTT) **51**, 23-26 (2009).
[25] M. Bechelany, A. Brioude, D. Cornu, G. Ferro, P. Miele. Adv. Funct. Mater.17, 939 (2007).
[26] A.S. Mukasyan, Y.Ch. Lin, A.S. Rogachev, D.O. Moskovskikh. Direct combustion synthesis of silicon carbide nanopowder from the elements. Journal of the European Ceramic Society **96**, No.1, 111-117 (2013).

Микрокремнеземдан фойдаланиб кремний карбиди нанокукунларини карботермик синтез қилиш

Б.М. Абдурахманов[1], М.Ш. Курбанов[1], У.М. Нуралиев[1], В.М. Ротштейн[1], У.Н. Рузиев[2]

[1]У.А. Арифов номидаги Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси, Дўрмон йўли 33, 100125 Тошкент, Ўзбекистон
[2]Олмалиқ КМК Нодир металлар ва қотишмалар ишлаб чиқариш бирлашмаси, Олмалик, Ўзбекистон

Таркибида 95-97% ли аморфли кремний оксиди бўлган ва техник кремний ва ферросилиций ишлаб чиқаришда ҳосил бўладиган юқори дисперсли техноген чиқинди микрокремнеземни карботермик тиклаш орқали кремний карбидининг микро- ва нанокукунлари синтез қилинган. Ушбу усул билан 4H, 6H и 3C политипли кремний карбидини синтез қилиш мумкунлиги кўрсатилган. Синтез қилинган кремний карбиди зарраларининг ўлчами фойдаланилган углеродли тикловчи зарраларининг размерига боғлиқлиги аниқланган.

Калит сўзлар: синтез, кремний карбиди микрокремнезем, микро- ва нанокукунлар, кремний карбиди политиплари, зарра ўлчамлари.

©Академия наук Республики Узбекистан, Ташкент, 2021 г.