Влияние мощности дугового разряда постоянного тока на продукт синтеза системы Si – C

А. Я. Пак, Т. Ю. Якич, О. А. Болотникова

Рассмотрен безвакуумный электродуговой синтез порошковых материалов в системе “углерод – кремний”. Оценена возможность управления фазовым, гранулометрическим составом и морфологией частиц продукта в процессе безвакуумного электродугового синтеза. По данным рентгеновской дифрактометрии в составе полученного продукта идентифицируется кубическая модификация карбида кремния с параметром элементарной ячейки 4,375 ± 0,016 Å; также исходный кремний и несвязанный углерод в форме графита. Показана зависимость фазового состава продукта от средней мощности дугового разряда. Определены морфологические типы полученных в серии экспериментов кристаллов карбида кремния, оценен средний размер частиц карбида кремния, изучен химический состав продукта синтеза. Применяемый безвакуумный электродуговой метод отличается отсутствием необходимости формирования защитной газовой среды внутри герметичной камеры электродугового реактора постоянного тока совмещенного типа, так как процесс проходит в атмосфере газа CO, который генерируется при горении дугового разряда в воздушной среде.

Ключевые слова: карбид кремния, морфология, структура, электродуговой синтез, безвауумный метод, электрическая мощность.

DOI: 10.30791/1028-978X-2020-2-64-71

Введение

Карбид кремния (SiC) является широко известным синтетическим сверхтвердым тугоплавким материалом с устойчивыми полупроводниковыми свойствами в широком диапазоне температур, с высокой стойкостью к агрессивным средам, воздействию различных видов излучения [1 – 4]. Порошковые материалы на основе карбида кремния применяют в качестве абразивов, а также в качестве сырья для получения сверхтвердой керамики, армированных композиционных материалов [5 – 8]. В настоящее время в научных и производственных целях используют различные методы получения карбида кремния, например, карботермическое восстановление SiO_2 [9] с применением различных типов печей (индукционных, резистивных, микроволновых) [10 – 12]; химическое осаждение из газовой фазы (*Chemical vapor deposition*, CVD) [13], генерация плазмы электрическим разрядом [14], создание электронных пучков [15]. Одним из относительно новых подходов к получению порошковых материалов на основе карбида кремния является безвакуумный электродуговой метод синтеза (DC APAS-метод, Direct current air arc plasma synthesis) карбида кремния, основанный на генерации атмосферной плазмы [16].

Цель настоящей работы — исследование влияния мощности дугового разряда на продукт синтеза в системе “углерод – кремний” при безвакуумном электродуговом синтезе порошковых материалов.

Методы

Экспериментальные исследования проводили на плазменном электродуговом реакторе совмещенного типа [16]. Основу установки составляет источник постоянного тока, к которому подключали графитовые электроды, один из которых выполнен в виде сплошного стержня, второй — в форме тигля (стакана). На дно тигля закладывали смесь исходных реагентов: смешанных в шаровой мель-

нице кремния и графита в массовом соотношении Si:C = 2:1. В полости тигля поджигали дуговой разряд постоянного тока, благодаря чему в системе поднимается температура до нескольких тысяч градусов [17], и, согласно известной диаграмме состояний системы “углерод – кремний” [1] при последующем охлаждении, реализуются условия для формирования кристаллических фаз карбида кремния. Особенностью разрабатываемого метода является его реализация без применения вакуумного оборудования и газовых систем для создания инертной атмосферы. Такой подход в последние 3 – 5 лет активно применяется для получения углеродных наноструктур [18, 19], карбидов металлов и неметаллов [16, 20]. В данной работе вольтамперные характеристики дугового разряда изменяли путем варьирования параметров силового источника питания на базе инверторного преобразователя частоты и управляемого выпрямителя с широтно-импульсным регулятором. Среднюю мощность дугового разряда в интервале времени его существования (от 0 до 10 с) определяли как частное выделившегося количества энергии и времени t; энергию определяли интегрированием кривой мощности по времени в интервале 0 до t с; в свою очередь кривую мощности вычисляли как произведение осциллограммы тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$.

Полученный порошковый материал собирали с внутренней поверхности катода, перемалывали в агатовой ступке до достижения гомогенности; анализировали методами рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD7000s, CuK_α-излучение, шаг гониометра 0,02 °, ток трубки 30 мА, напряжение 40 кВ); растровой электронной микроскопии (РЭМ) (Tescan Vega 3 SBU с применением энергодисперсионого анализатора Oxford, HV = 20 кВ, WD = 15 мм). Также использовали ряд программных пакетов: база данных PDF4+ (релиз 2019 года), программа анализа рентгеновских дифрактограмм Powder Cell 2.4.

Результаты и обсуждение

По данным рентгеновской дифрактометрии (рис. 1) в составе каждого из полученных продуктов синтеза можно выделить три основные кристаллические фазы: графит, кубическая фаза кремния, кубическая фаза карбида кремния (βSiC). О наличии данных кристаллических фаз свидетельствуют основные дифракционные максимумы, обозначенные на типичной дифрактограмме продукта (рис. 1). Фазы графита и кубического кремния не представляют особого интереса в рамках

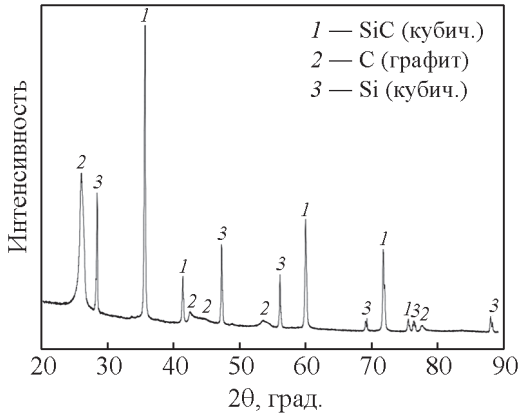

Рис. 1. Типичная картина рентгеновской дифракции (λ = 1,54060 Å) порошкового продукта электродугового синтеза в системе “углерод – кремний”

Fig. 1. Typical X-ray diffraction pattern (λ = 1.54060 Å) of the powder electric arc synthesis product in the carbon-silicon system.

данной работы, поэтому их структура детально не описана в данной работе в целях сохранения фокуса на основной искомой кристаллической фазе βSiC. Явно выраженные дифракционные максимумы на 2θ, равном 35,69°, 41,45°, 60,06°, 71,86°, 75,60° могут быть идентифицированы как отражения кристаллических плоскостей (111), (200), (220), (311) и (222), соответствующих структуре βSiC [21]. Следует отметить наличие следов максимума около 2θ = 34 ° (рис. 1), которые можно связать с вероятным наличием дефектов структуры кубической фазы карбида кремния, типично идентифицируемым в научной практике и возникающим ввиду высоких термических нагрузок на материал [22]. Параметр кубической решетки карбида кремния, определенный по серии из 6 экспериментов, составил 4,375 ± 0,016 Å. Согласно содержанию международной базы PDF4+, наиболее близким эталоном βSiC является карточка ICDD № 00 029 1129 с эталонным параметром решетки 4,359 Å. Отличия эталонного и экспериментально определенного параметра решетки могут быть отнесены к инструментальной погрешности дифрактометра, погрешности определения вершин дифракционных максимумов в программе Powder Cell 2,4.

Количественный рентгенофазовый анализ экспериментальных образцов позволил построить зависимость фазового состава продукта от средней мощности дугового разряда постоянного тока (рис. 2), поддерживаемой плазменным реактором в течение заданного интервала времени от 0 до 10 с

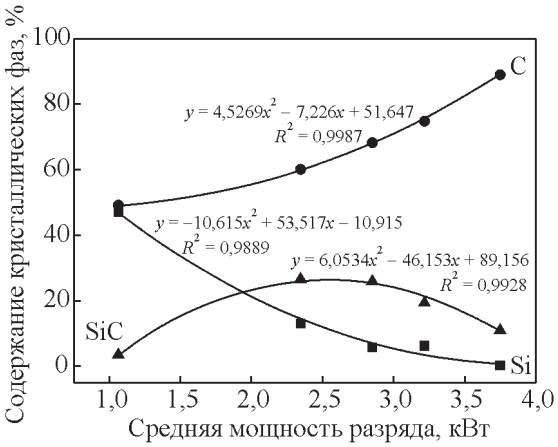

Рис. 2. Зависимость фазового состава продукта от средней мощности дугового разряда.

Fig. 2. The phase composition dependence of the product on the average arc discharge power.

(в каждом эксперименте). Как видно на рис. 2, все три зависимости (содержаний кремния, графита и карбида кремния как функций средней мощности разряда) аппроксимируются простейшими стандартными алгоритмами на базе MS Excel полиномами второй степени с достоверностью R^2 не менее 0,99. Согласно полученным данным, доля кубического кремния уменьшается с ростом средней мощности $P_{ср}$, на всем исследуемом интервале от 1 до 4 кВт. Обозначенная зависимость представляется естественной, так как более высокая мощность при неизменной продолжительности горения разряда обеспечивает выделение в системе большего количества энергии, необходимого для реализации синтеза. Доля графита возрастает на всем исследуемом интервале, что можно объяснить известным явлением электроэрозии анода с переносом части его массы на катод в процессе горения дугового разряда постоянного тока [18]. Соответственно, содержание карбида кремния возрастает в интервале мощности дугового разряда от 1 до 2,5 кВт, затем снижается вплоть до конца исследуемого интервала; рост содержания карбида кремния обусловлен процессом его синтеза и расходом исходного кремния, а снижение содержания карбида кремния можно объяснить доминированием процессов образования катодного депозита входе переноса массы графита при повышении средней мощности разряда свыше 2,5 кВт. С точки зрения практической ценности получаемых результатов и синтезированного материала наиболее интересен продукт, полученный при наибольшей $P_{ср}$, так как получение двухфазного продукта, состоящего из графита и карбида кремния, позволяет отжигом материала в атмосферной печи выделить из данной смеси βSiC с чистотой до 99 масс. % [16].

Согласно данным растровой электронной микроскопии в результате синтеза образуются идиоморфные кристаллы карбида кремния с четкими кристаллографическими очертаниями преимущественно уплощенного габитуса с размером 20 – 30 мкм (рис. 3*a*). Они могут срастаться в агрегаты (рис. 3*b*) с образованием отрицательных кристаллов (рис. 3*c*). Дальнейшее разрушение этих сростков происходит по базовой системе, включающей плоскости спайности и отдельность по (0001). В некоторых областях проба загрязнена никель-железистыми фазами (рис. 3) с содержанием единиц процентов (масс.). Эти металлы входят в состав металлических клемм, которыми подключают графитовые электроды в схеме силового контура; вследствие взаимодействия плазменного образования с материалом контактных клемм, осаждаются металлические капли, которые могут являться катализаторами роста граней кристаллов (рис. 3). Нередко встречаются дендритоподобные формы (рис. 3*d*), по всей видимости, отражающие начальную неполную стадию формирования кристаллов βSiC. За счет высокой скорости протекания процесса роста, обусловленной временем и способом синтеза, вероятно, успевают образоваться только определенные направления будущего кристалла. Местами отмечаются следы частично-прореагировавшего графита с сохранением центральной части сложенной исходным углеродом в форме графита.

Помимо хорошо ограненных кристаллов SiC и их сростков на рис. 4 видны сферулы и натечные образования SiC, содержащие в своем составе от 5 до 20 масс.% кислорода. По своему составу кислородсодержащие фазы SiC напоминают силоксикон (промежуточный продукт синтеза SiC). Его можно получить при нагревании до температуры белого каления кристаллического кремния в атмосфере углекислого газа, который генерируется в зоне формирования плазменной структуры [23]. Кроме того, особенностями применяемого подхода к синтезу карбида кремния, а именно, использование атмосферного воздуха в качестве рабочей газовой среды, можно объяснить появление такой фазы, а также окислением части исходных материалов и продуктов кислородом воздуха в силу неполного экранирования реакционного объема генерируемой дуговым разрядом атмосферой CO. Вероятно, сферулы, содержащие в составе кислород образуются на поверхности наиболее близкой к верхнему краю

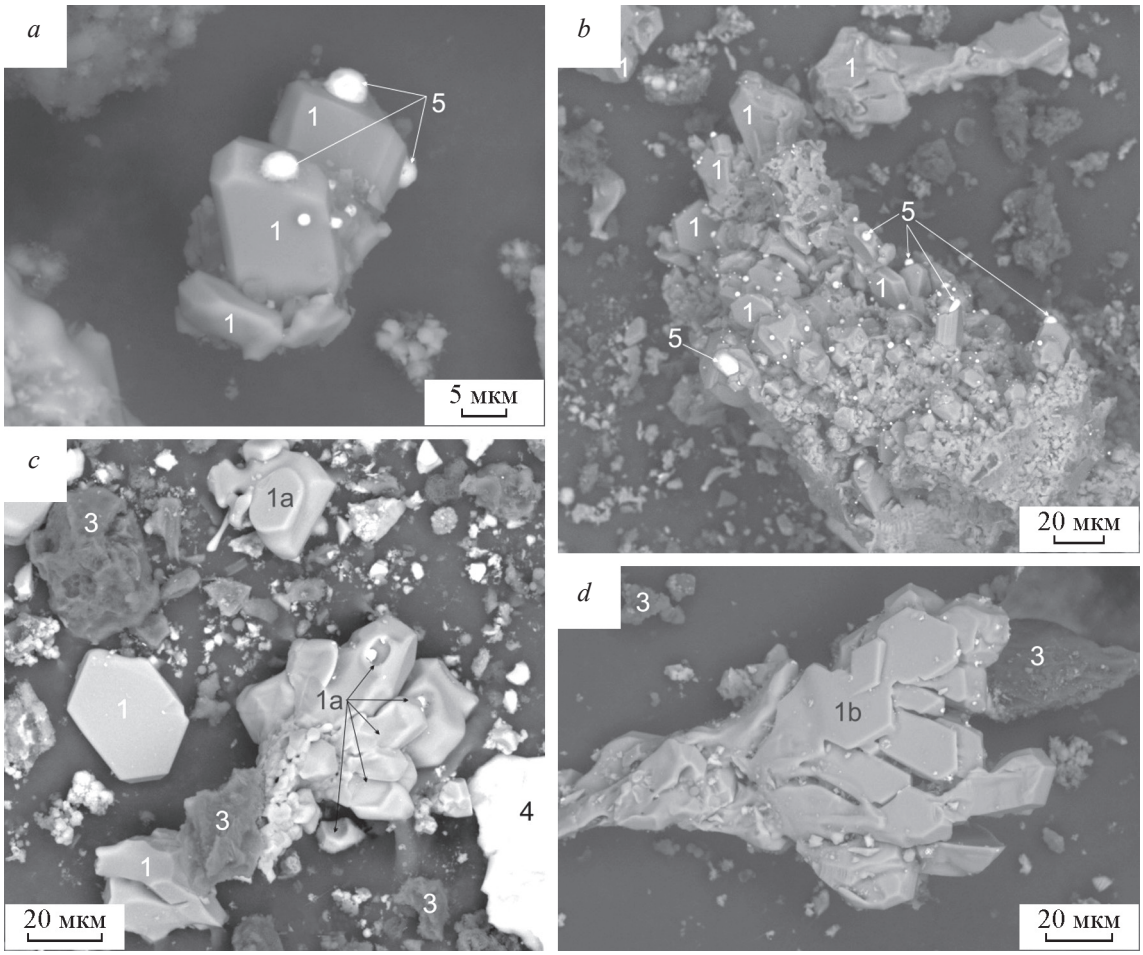

Рис. 3. РЭМ-изображения: *a* — идиоморфные кристаллы кубического карбида кремния (*1*) уплощенного габитуса; *b* — агрегаты сросшихся кристаллов карбида кремния (*1*); *c* — отрицательные кристаллы (*1a*) карбида кремния; *d* — дендриты (*1b*) и их сростки; *3* — графит, *4* — кремний, *5* — Fe – Ni сплав.

Fig. 3. SEM images: *a* — idiomorphic crystals of cubic silicon carbide (*1*) stretched habitus; *b* — aggregates of silicon carbide fused together (*1*); *c* — negative crystals (1*a*) of silicon carbide; *d* — dendrites (1*b*) and their aggregations; *3* — graphite, *4* — silicon, *5* — Fe – Ni alloy.

графитового тигля-катода, в полости которого происходит синтез. Эта область реакционного объема в силу конструкции экспериментальной установки наиболее подвержена воздействию атмосферного воздуха в ходе работы системы.

Элементный анализ пробы в областях, где доминируют кристаллы, идентифицированные как карбид кремния, показал по результатам 25 измерений содержание: углерода — 65, 0 масс. % (при среднеквадратичном отклонении σ = 4,3 %); кремния — 29,4 масс. % (σ = 4,8 %); кислорода — 5,3 масс. % (σ = 1,3 %), а также различных примесей из числа широко распространенных элементов (Na, Ca, Ti, Fe и др.) с суммарным содержанием до 3,5 масс. %.

Представленные результаты требуют анализа с точки зрения сопоставления с другими методами синтеза карбида кремния. Для этой цели в табл. 1 представлено сравнение предлагаемого метода получения карбида кремния с наиболее близкими аналогами — 5 основными методами. Полное технико-экономическое сравнение не представляется возможным в пределах данной работы, поэтому в табл. 1 приведены в качестве основных критериев лишь те из них, которые в значительной мере отличаются в рамках разрабатываемого электродугового метода: давление газовой среды в ходе синтеза, состав газовой среды, расход газа, примерная продолжительность синтеза. Следует отметить, что в рамках различных методов возможно получение продукта, состоящего преимущественно из карбида кремния и углеродных рентгеноаморфных или кристаллических фаз, которые можно удалить

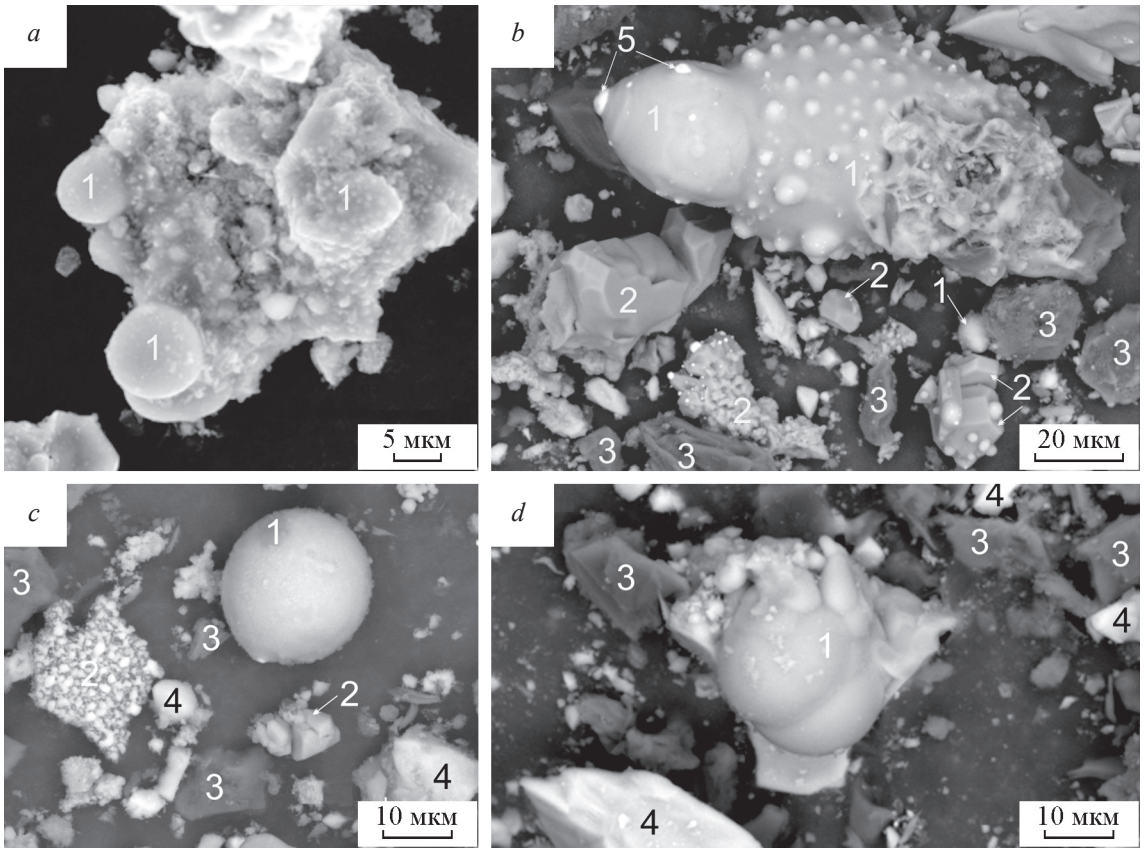

Рис. 4. РЭМ изображения: *a*, *b* — агрегаты натечного строения, *a*, *c* — сферулы, *d* — округлые стяжения силоксикона (*1*): *2* — идиоморфные кристаллы и их сростки кубического карбида кремния (SiC) уплощенного габитуса, *3* — графит, *4* — кремний, *5* — Fe – Ni сплав.

Fig. 4. SEM-images: *a*, *b* — aggregates of singer structure, *a*, *c* — spherules, *d* — rounded bundle of a siloxicon (*1*); *2* — idiomorphic crystals and their aggregates of cubic silicon carbide (SiC) stretched habitus, *3* — graphite, *4* — silicon, *5* — Fe – Ni alloy.

Таблица 1

Методы получения карбида кремния и их основные характеристики

Table 1

Methods of SiC obtaining and their properties

№	Метод	Рабочая среда	Рабочее давление, атм	Продолжительность рабочего цикла процесса синтеза	Источник
1	Карботермическое восстановление	Ar	10^{-9} – 1	~90 минут и более	[24, 26, 29, 33, 34, 35]
2	Генерация электронных пучков	Ar	10^{-9} – 10^{-6}	120 минут и более	[15, 25]
3	Генерация плазменных струй	Ar, H2	~ 0,5	20 – 30 минут и более	[36, 28, 30, 27]
4	Электродуговой	He	~0,2 – 0,25	5 – 15 минут	[31, 32]
5	Безвакуумный электродуговой	—	1,0	Порядка 1 минуты	Данная работа

из продукта синтеза термическим воздействием в воздушной среде. Видно, что все методы требуют создания защитной газовой среды в процессе синтеза, что является основным отличием от разрабатываемого безвакуумного метода. Соответственно, вакуумная система подразумевает необходимость работы вакуумного насоса, как правило, в непрерывном или повторно-кратковременном режиме, что влечет за собой значительное энергопотребление, а также затраты времени на операцию вакуумирования. Кроме того, необходимость расходования инертных газов в процессе синтеза и на его подготовительных этапах также является важным отличием известных методов от разрабатываемого безвакуумного. Следует отметить, что представленный в данной работе метод позволят реализовать один рабочий цикл синтеза (с получением достаточного для дальнейшего анализа продукта, порядка 1 г) за время порядка 1 минуты, то есть с более высокой производительностью относительно прямого электродугового аналога. В свою очередь, более высокая производительность достигается за счет внесения исходных реагентов заблаговременно в реакционную зону, что позволяет отказаться от поддержания длительного горения разряда для электроэрозионной наработки продукта. Более короткий рабочий цикл системы также позволяет не использовать системы жидкостного (водяного) охлаждения конструктивных элементов установки, удерживающих электроды в заданном положении. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности разработки безвакуумного электродугового метода получения карбида кремния и исследования тех или иных аспектов его реализации.

Выводы

По совокупности представленных данных можно сделать вывод о возможности влияния на фазовый состав продукта безвакуумного электродугового синтеза системы “углерод – кремний” средней мощностью разряда.

В составе продукта синтеза идентифицировано несколько морфологических типов частиц, представляющих кубическую фазу карбида кремния: идиоморфные кристаллы уплощенного габитуса, агрегаты сросшихся кристаллов карбида кремния, отрицательные кристаллы карбида кремния, дендриты и их сростки. На данном этапе исследований не удалось выявить механизмы влияния на морфологию получаемых кристаллов кубического карбида кремния.

Представленное в работе сравнение различных методов получения карбида кремния показывает целесообразность дальнейших исследований и развития безвакуумного электродугового метода βSiC и других материалов.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-633.2019.8).

Литература/References

1. Tsunenobu Kimoto. Bulk and epitaxial growth of silicon carbide. Science Direct of Materials, 2016, no. 62, pp. 329 – 335.
2. Hamid Amini Moghadam, Sima Dimitrijev, Jisheng Han, Daniel Haasmann. Active defects in MOS devices on 4H-SiC: A critical review. Microelectronics Reliability, 2016, pp. 1 – 9.
3. Jung-Hye Eom, Young-Wook Kim, Santosh Raju J.-H. Eom et al. Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review. Journal of Asian Ceramic Societies, 2013, no. 1, pp. 220 – 242.
4. Kovalčíkováa A., Sedláček J., Lenčéš Z., Bystrický R., Dusza J., Šajgalík P. Oxidation resistance of SiC ceramics prepared by different proceessing routes. Journal of the European Ceramic Society, 2016, pp. 1 – 11.
5. Zhenhua He, Rong Tu, Hirokazu Katsui, Takashi Goto. Synthesis of SiC/SiO_2 core–shell powder by rotary chemical vapor deposition and its consolidation by spark plasma sintering. Ceramics International, 2013, no. 39 pp. 2605 – 2610.
6. Moskovskikh D.O., Ya-Cheng Lin, Rogachev A.S., McGinn P.J., Mukasyan A.S. Spark plasma sintering of SiC powders produced by different combustion synthesis routes. Journal of the European Ceramic Society, 2015, no. 35, pp. 477 – 486.
7. Jian Wei. Fabrication of composite structure of carbon fibers and high density SiC nanowires. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2009, no. 41, pp. 1810 – 1813.
8. Xinmei Hou, Enhui Wang, Zhi Fang, Junhong Chen, Kuo-Chin Chou. Characterization and properties of silicon carbide fibers with selfstanding membrane structure. Journal of Alloys and Compounds, 2015, no. 649, pp. 135 – 141.
9. Liang C.H., Meng G.W., Zhang L.D., Wu Y.C., Cui Z. Large-scale synthesis of b-SiC nanowires by using mesoporous silica embedded with Fe nanoparticles. Chemical Physics Letters, 2000, no. 329, pp. 323 – 328.
10. Ya-Juan Hao, Guo-Qiang Jin, Xiao-Dong Han, Xiang-Yun Guo. Synthesis and characterization of bamboo-like SiC nanofibers. Materials Letters, 2006, no. 60, pp. 1334 – 1337.
11. Song Liu, Jigang Wang. Room-temperature magnetic properties of SiC based nanowires synthesized via

microwave heating method. Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, 2016, no. 81, pp. 268 – 274.
12. Xiaogang Luo, Wenhui Ma, Yang Zhou, Dachun Liu, Bin Yang, Yongnian Dai. Synthesis and photoluminescence property of silicon carbide nanowires via carbothermic reduction of silica. Nanoscale Research Letter, 2010, no. 5, pp. 252 – 256.
13. Yi-cheng GE, Yun-qi Liu, Shuai Wu, Huang Wu, Pei-ling Mao, Mao-zhong Yi. Characterization of SiC nanowires prepared on C/C composite without catalyst by CVD. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, no. 25, pp. 3258 − 3264.
14. Li Y.B., Xie S.S., Zou X.P., Tang D.S., Liu Z.Q., Zhou W.Y., Wang G. Large-scale synthesis of b-SiC nanorods in the arc-discharge. Journal of Crystal Growth, 2001, no. 223, pp. 125 – 128.
15. Ahmad M., Akhter J.I., Ali G., Akhter M. In-situ synthesis of oxygen free SiC fibers and ropes by electron beam melting. Materials Letters, 2007, no. 61, pp. 956 – 959.
16. Pak A.Y., Rudmin M.A., Mamontov G.Y., Bolotnikova O.A. Electroarc synthesis and cleaning from carbon impurities of cubic silicon carbide in the air atmosphere. Journal of Superhard Materials, 2018, no. 40, pp. 157 – 163.
17. Schur D.V., Dubovoy A.G., Zaginaichenko S.Yu., Adejev V.M.,. Kotko A.V, Bogolepov V.A, Savenko A.F, Zolotarenko A.D. Production of carbon nanostructures by arc synthesis in the liquid phase. Carbon, 2007, no. 45, pp. 1322 – 1329.
18. Arora N., Sharma N.N. Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review. Diamond & Related Materials, 2014, no. 50, pp. 135 – 150.
19. Yanjie Su, Yafei Zhang. Carbon nanomaterials synthesized by arc discharge hot plasma. Carbon, 2015, no. 83, pp. 90 – 99.
20. Pak A.Y., Mamontov G.Y. Boron carbide synthesis in low-voltage DC electric arc initiated in open air. Technical Physics Letters, 2018, no. 44(7), pp. 615 – 617.
21. Tao Hana, Ruiying Luoa, Guangyuan Cuia, Lianyi Wang. Effect of SiC nanowires on the high-temperature microwave absorption properties of SiCf/SiC composites. Journal of the European Ceramic Society, 2019, no. 39, pp. 1743 – 1756.
22. Dai J.X., Sha J.J., Zhang Z.F., Wanga Y.C., Krenkel W. Synthesis of high crystalline beta SiC nanowires on a largescale without catalyst. Ceramics International, 2015, no. 41, pp. 9637 – 9641.
23. Yanjie Su, Hao Wei, Tongtong Li, Huijuan Geng, Yafei Zhang. Low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by low-pressure air arc discharge. Materials Research Bulletin, 2014, no. 50, pp. 23 – 25.
24. Chen J., Wu R., Yang G., Pana Y., Lin J., Wu L., Zhai R. Synthesis and photoluminescence of needle-shaped 3C–SiC nanowires on the substrate of PAN carbon fiber. J. Alloys Compounds, 2008, vol. 456, pp. 320 – 323.
25. Li J.C., Lee C.S., Lee S.T. Direct growth of β-SiC nanowires from SiO_x thin films deposited on Si (100) substrate. Chem. Phys. Letters 2002, no. 355, pp. 147 – 150.
26. Qiang X., Li H., Zhang Y., Wang Z., Ba Z. Synthesis and toughening effect of SiC nanowires wrapped by carbon nanosheet on C/C composites. J. Alloys Compounds, 2016, no. 676, pp. 245 – 250.
27. Rai P., Kim Y-S, Kang S-K, Yu Y-T. Synthesis of nanosized silicon carbide through non-transferred arc thermal plasma. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2012, no. 32, pp. 211 – 218.
28. Czosnek C., Bucko M.M., Janik J.F., Olejniczak Z., Bystrzejewski M., Łabedz O., Huczko A. Preparation of silicon carbide SiC-based nanopowders by the aerosol-assisted synthesis and the DC thermal plasma synthesis methods. Materials Research Bulletin, 2015, no. 63, pp. 164 – 172.
29. Masoudifar S., Bavand-Vandchali M., Golestani-Fard F., Nemati A. Molten salt synthesis of a SiC coating on graphite flakes for application in refractory castables. Ceramics International, 2016, pp. 1 – 7.
30. Rao N, Micheel B, Hansen D, Fandrey C, Bench M, Girshick S, Heberlein J, McMurry P. Synthesis of nanophase silicon, carbon, and silicon carbide powders using a plasma expansion process. Materials Research Society, 1995, no. 10, pp. 2073 – 2084.
31. Li Y.B., Xie S.S., Zou X.P., Tang D.S., Liu Z.Q, Zhou W.Y., Wang G. Large-scale synthesis of β-SiC nanorods in the arc-discharge. Journal of Crystal Growth, 2001, no. 223, pp. 125 – 128.
32. Li Y., Xie S., Wei B., Lian G., Zhou W., Tang D., Zou X., Liu Z., Wang G. Aligned small α-SiC nanorods on β-SiC particles grown in an arc-discharge. Solid State Communications, 2001, no. 119, pp. 51 – 53.
33. Li X, Chen X, Song H. Synthesis of β-SiC nanostructures via the carbothermal reduction of resorcinol–formaldehyde/SiO_2 hybrid aerogels. Journal Materials Science 2009, no. 44, pp. 4661 – 4667.
34. Liu S., Wang J. Room-temperature magnetic properties of SiC based nanowires synthesized via microwave heating method. Physical E: Low-dimensional Systems and Nonostructures, 2016, no. 81, pp. 268 – 274.
35. Prabhakar Raia, Je-Shin Park, Gyeong-Geon Parka, Woo-Min Lee, Yeon-Tae Yu, Sang-Ki Kang, Se-Youn Moon, Bong-Guen Hong. Influence of carbon precursors on thermal plasma assisted synthesis of SiC nanoparticles. Advanced Powder Technology, 2014, no. 25, pp. 640 – 646.
36. Yu I.K., Rhee J.H., Cho S., Yoon H.K. Design and installation of DC plasma reactor for SiC nanoparticle production. Journal of Nuclear Materials, 2009, no. 386 – 388, pp. 631 – 633.

Статья поступила в редакцию — 27.05.2019 г.
после доработки — 23.07.2019 г.
принята к публикации — 24.07.2019 г.

Пак Александр Яковлевич *— Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634034, г. Томск, ул. Советская 84/3, Кибернетический центр ТПУ, офис 317), кандидат технических наук, доцент, специалист в области электродугового синтеза порошковых материалов, в частности углеродных наноструктур и карбидов металлов и неметаллов. E-mail: ayapak@tpu.ru.*

Якич Тамара Юрьевна *— Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634034, г. Томск, ул. Советская 84/3, Кибернетический центр ТПУ, офис 317), кандидат геолого-минералогических наук, доцент, специалист в области кристаллографии, растровой электронной микроскопии. E-mail: cherkasovatu@tpu.ru.*

Болотникова Ольга Александровна *— Национальный исследовательский Томский политехнический университет (634034, г. Томск, ул. Советская 84/3, Кибернетический центр ТПУ, офис 317), студентка, специализируется в области электродугового синтеза карбида кремния. E-mail: bolotnikovaoa@gmail.com.*

Effect of DC arc discharge power on synthesis of Si – C product system

A. Ya. Pak, T. Yu. Yakich, O. A. Bolotnikova

Silicon carbide is important for science and technology superhard semiconductor material, characterized by high resistance to aggressive environments and high temperatures in air. In this regard, the development of methods for silicon carbide production is an urgent task. This paper presents the experimental studies results on ways to control the phase, particle size and particles morphology of the vacuumless electric arc synthesis product of powder materials in the carbon-silicon system. According to X-ray diffraction data, the composition of the product identifies a cubic silicon carbide modification with a unit cell parameter of 4.375 ± 0.016 Å; also initial silicon and unbounded carbon in the form of graphite are identified in the synthesis product. The work shows the phase composition dependence of the product on the average power of the arc discharge. The morphological types of silicon carbide crystals obtained in a series of experiments were also determined, the average particle size of silicon carbide and the chemical composition of the synthesis product were estimated. The vacuumless electric-arc method used is distinguished by the absence of the need to form a protective gas environment inside the combined-type DC arc reactor chamber. The process takes place in atmosphere of CO, which is generated in the burning arc discharge in air process.

Keywords: silicon carbide, morphology, structure, electric arc synthesis, vacuumless method, electrical power.

Pak Alexander *— National Research Tomsk Polytechnic University (Russia, 634034, Tomsk, Sovetskaya 84/3), PhD, associate professor of the department of Automation and Robotics, specialist in the field of electric arc synthesis of powder materials, in particular carbon nanostructures and carbides of metals and non-metals. E-mail: ayapak@tpu.ru.*

Yakich Tamara *— National Research Tomsk Polytechnic University (Russia, 634034, Tomsk, Sovetskaya 84/3), PhD, associate professor of the department of Geology, specialist in the field of crystallography, scanning electron microscopy. E-mail: cherkasovatu@tpu.ru.*

Bolotnikova Olga *— National Research Tomsk Polytechnic University (Russia, 634034, Tomsk, Sovetskaya 84/3), student, specialist in the field of electric arc synthesis of silicon carbide. E-mail: bolotnikovaoa@gmail.com.*