

**УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОДУКТА СИСТЕМЫ SI-C, ПОЛУЧЕННОГО С  
ПОМОЩЬЮ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ**

Д.С. Никитин

Научный руководитель: профессор, д.т.н. А.А. Сивков  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: dima\_n@sibmail.com

**THE MANAGEMENT OF SI-C PRODUCT CHARACTERISTICS OBTAINED USING COAXIAL  
MAGNETOPLASMA ACCELERATOR**

D.S. Nikitin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Sivkov  
Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: dima\_n@sibmail.com

*The direct plasmodynamic synthesis of ultradispersed silicon carbide under the action of supersonic pulse flow of carbon–silicon electric discharge plasma onto a copper barrier in the argon atmosphere has been realized. A powdered product with a high SiC content has been obtained, whose single crystals have a mean size of about 100 nm and natural crystallographic habit close to the ideal one.*

История использования карбида кремния в промышленности начинается с применения его механических характеристик. Впервые SiC был получен в графитовой электропечи Ачесона посредством высокотемпературного отжига продукта и пропускания сквозь порошкообразные прекурсоры (песок и какой-либо углеродный продукт) [1]. Полученный материал нашел широкое применение в обрабатывающей промышленности: для создания высококачественного и архиострого лезвийного, режущего, абразивного инструмента. В дальнейшем начали создаваться функциональные керамические изделия из карбида кремния, имеющие высокие механические (износостойкость, сверхтвердость), тепловые (высокая устойчивость к воздействию высоких температур, низкий коэффициент теплового расширения, высокая температура плавления, жаропрочность), химические (коррозионная стойкость), радиационные (устойчивость к радиационному излучению) [2-4]. Это обусловило широкое применение карбида кремния в промышленности и технике – в двигателестроении, химической промышленности и металлургии, машиностроении, атомной промышленности и др. Особенного внимания заслуживает научно-техническое направление, связанное с применением полупроводниковых свойств SiC и созданием устройств электроники, в особенности силовой и высокочастотной, устойчивой к внешним воздействиям [5].

Следует отметить, что одним из наиболее перспективных направлений научной мысли сегодня является применение нанотехнологий. При наноструктурном подходе используются возможности различных нанотехнологий для создания наноструктуры, характеризующейся малыми размерами (от 1-2 до ~100 нм) основных структурных составляющих (зерен, фазовых включений, слоев и пор). Причина актуальности вопроса состоит в том, что наноструктурный подход обеспечивает получение разнообразных конструкционных и функциональных материалов с высоким уровнем физико-химических и физико-механических характеристик [6]. Получение наноразмерных образований карбида кремния

также является, судя по отечественным и зарубежным научным публикациям, весьма обсуждаемой проблемой, активно развиваются методы синтеза нано-карбида кремния [7].

Одним из путей получения нанопорошков карбида кремния является специфическая импульсная плазменная установка – коаксиальный магнитоплазменный ускоритель [8]. Такой метод синтеза получил название плазмодинамический [8]. В основе метода лежит проведение синтеза в гиперскоростной струе углерод-кремниевой электроразрядной плазмы. В качестве прекурсоров использовались микронные порошки кремния и углерода в виде сажи. Синтез происходил в условиях действия сверхвысоких энергетических параметров в скачке уплотнения плазменного потока, что обуславливает создание высокоэнергетических связей Si-C.

В настоящей работе используются данные, относящиеся к двум опытам. Магнитоплазменный ускоритель получал электропитание от емкостного накопителя энергии с емкостью конденсаторных батарей 6 мФ и зарядным напряжением 3 кВ. Таким образом, накопленная энергия составляла 27 кДж. В опытах изменялось только соотношение прекурсоров Si/C – от 2,5/1 в первом опыте к 3,0/1 во втором. Выделенная энергия, судя по осциллограммам, составляла около 19 кДж.

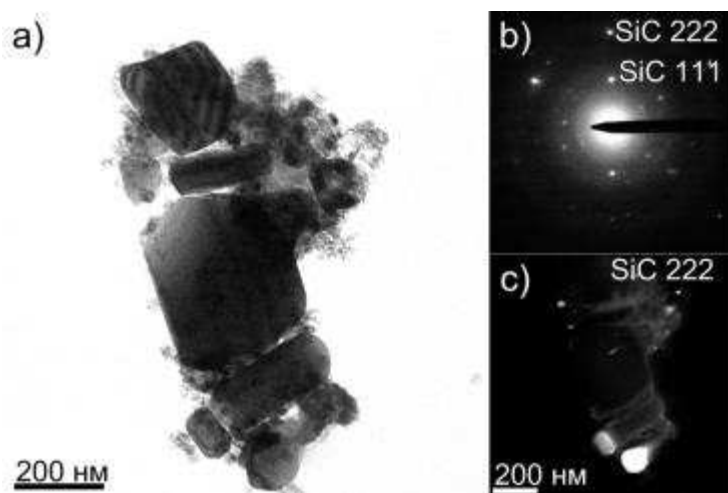


Рис. 1. Микроснимки продукта при соотношении прекурсоров Si/C 2,5/1

После проведения экспериментов со стенок камеры-реактора был собран ультрадисперсный порошокобразный продукт, который без какой-либо предварительной обработки анализировался методами просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 1 приведены результаты исследования продукта, полученного в первом опыте средствами просвечивающей электронной микроскопии (transmission electron microscopy –

TEM). На рис. 1,а приведен светлопольный микроснимок, на котором видно, что продукт преимущественно состоит из многогранных кристаллов размерами в несколько сотен нанометров. На картине электронной дифракции, изображенной на рис. 1,б, заметны максимумы интенсивности, соответствующие монокристаллам кубического карбида кремния. На рис. 1-с изображен темнопольный ТЕМ-снимок, на котором светятся отражающие плоскости доминирующих в продукте кристаллографически оформленных частиц, соответствующих фазе кубического карбида кремния. Следует также отметить, что оставшуюся в продукте фракцию составляют мелкие неопределенной формы частицы размерами до десятков нанометров.

На рис. 2 приведены для сравнения микроснимки, полученные для продукта второго опыта. Доминирующей в продукте фракцией является карбид кремния в виде монокристаллов многогранной формы (рис. 2-а); на картине дифракции отчетливы дифракционные кольца, соответствующие SiC. Однако в продукте отсутствуют частицы неопределенной формы, о наличии которых говорилось в прошлом эксперименте. При этом появились более крупные округлые частицы, соотносящиеся с фазой

кубического кремния, о чем говорит картина дифракции и темнопольные изображения. По совокупности приведенных микроснимков, в продукте значительно увеличилось количество кремния. Содержание же чисто углеродных фаз в виде мелкой фракции уменьшилось.

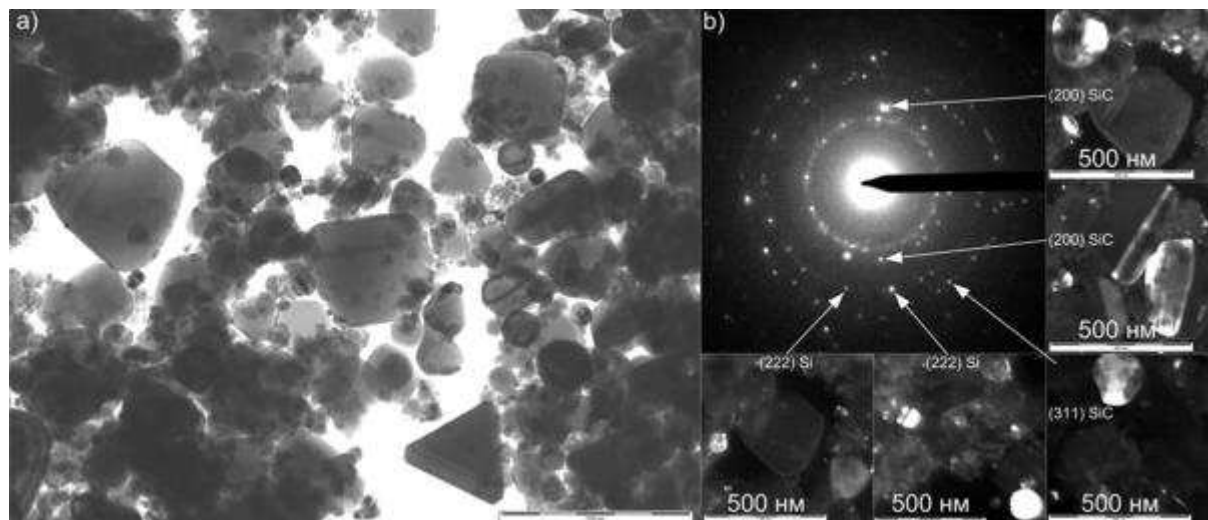


Рис. 2. Микроснимки продукта при соотношении прекурсоров Si/C 3,0/1

Таким образом, в работе приведены данные о синтезе кубической фазы нанодисперсного карбида кремния плазодинамическим способом. Исследованы особенности наночастиц синтезируемого материала на основе приведенных ТЕМ-снимков. Выявлена возможность управления фазовым составом продукта посредством изменения соотношения прекурсоров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 492 767 США. Production of artificial crystalline carbonaceous material / Acheson, G. – 1893.
2. Narushima T., Goto T., Hirai T. and Iguchi Y. High-Temperature Oxidation of Silicon Carbide and Silicon Nitride // Materials transactions, JIM. – 1997. – V. 38. – № 10. – P. 821–835.
3. Wesch W. Silicon carbide: synthesis and processing // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1996. – V. 116. – P. 305–321.
4. Silicon Carbide: Synthesis and Properties / Edited by Rosario Gerhardt. – USA: InTech, 2011. – 546 p.
5. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния – алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. – 2010. – Вып. 1. – С. 36-39.
6. Андриевский Р.А.. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы. - М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2012. – 252 с.
7. Andrievski R.A. Synthesis, structure and properties of nanosized silicon carbide // Reviews on advanced materials science. – 2009. – V. 22. – P. 1–20.
8. Сивков А.А., Никитин Д.С., Пак А.Я., Рахматуллин И.А. Прямой плазодинамический синтез ультрадисперсного карбида кремния // Письма в ЖТФ. – 2013. – Том 39, Вып. 2. – С. 15–20.