

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА ПРОДУКТ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО
СИНТЕЗА В СИСТЕМЕ SI-C**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

**INFLUENCE OF THE PLASMA JET ENERGY ON THE SI-C PRODUCT PLASMODYNAMIC
SYNTHESIS**D.S. Nikitin

Scientific Supervisor: Prof., Dr. A.A. Sivkov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenina ave., 30, 634050

E-mail: dima_n@sibmail.com

Synthesis of silicon carbide is interested due to the presence of a wide range of his unique mechanical, thermal and electrical properties: superhardness, strength, thermal and corrosion resistance, radiation hardness, unique semiconductor characteristics. There is a great number of nano-SiC synthesis techniques, but the unique mentioned properties of the produced SiC cannot be generally realized due to dependence on the synthesis methods. In this connection the development of new simple and productive methods for the direct synthesis of nanodispersed high-quality silicon carbide is an important problem. The paper presents the results of the plasmodynamic synthesis and the ability to control the synthesis process and to change product characteristics by the plasma jet energy. The above method can be realized in a high-speed pulse jet of the dense Si-C. The jet is generated by a pulse (~100 μs) high-current (~100 A) coaxial magnetoplasma accelerator with graphite electrodes. The synthesized product was analyzed by some modern techniques as X-ray diffraction. The main result of the paper is a demonstration of the capabilities plasmodynamic synthesis of nanosized cubic silicon carbide. Change of the input energy level can influence on phase composition, crystals growth and particle sizes.

Карбид кремния вызывает интерес у исследователей благодаря наличию у керамики на его основе целого спектра уникальных физических свойств, таких как сверхтвердость, высокая теплопроводность, низкий коэффициент теплового расширения, высокая ширина запрещенной зоны, стойкость к окислению, радиационная стойкость [1]. Совокупность полупроводниковых характеристик карбида кремния позволяет создавать на его основе устройств силовой, высокочастотной и высокотемпературной электроники [2]. Высока актуальность синтеза наноразмерного карбида кремния, развиваются различные способы синтеза нанодисперсных порошков [3], что обусловлено возможностью получения разнообразной конструкционной и функциональной керамики с высоким уровнем физико-химических и физико-механических характеристик. В статье [4] показана возможность прямого плазмодинамического синтеза кубического карбида кремния. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния энергетика процесса на фазовый состав и дисперсность продукта.

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

Генерация гиперскоростной струи плазмы осуществляется с помощью коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ). Электропитание ускорителя осуществляется от емкостного накопителя энергии с емкостью конденсаторов $C=6$ мФ. Выделившаяся энергия W изменялась от 10,5 кДж до 29,7 кДж за счет изменения зарядного напряжения $U_{зар}$ от 2,0 кВ до 3,5 кВ. Прекурсорами синтеза являлись нанодispersный углерод и микронный порошок кремния, смесь которых в соотношении, близком к стехиометрическому, закладывалась в канал формирования плазменной структуры. Проведено четыре эксперимента при разном зарядном напряжении. Плазменные выстрелы производились в герметичный объем цилиндрической камеры-реактора, заполненной аргоном. Плазменная струя воздействовала на медную преграду на расстоянии 23 мм от среза ускорительного канала.

Синтезированные в экспериментах порошкообразные продукты исследовались без предварительной подготовки методом рентгеновской дифрактометрии (XRD) на дифрактометре Shimadzu XRD 6000 (CuK α -излучение). Данные XRD-исследований представлены дифрактограммами на рисунке 1 и результатами структурно-фазового анализа, приведенными в таблице 2. Анализ проведен с использованием программ Powder Cell 2.4 и базы структурных данных PDF 4+.

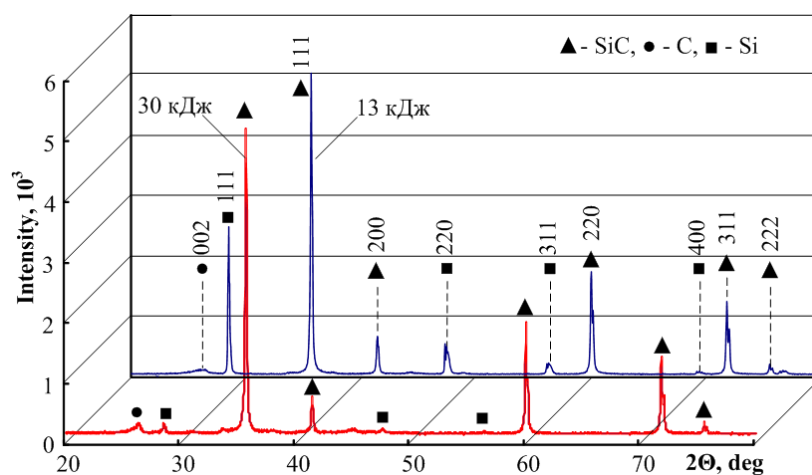


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы продуктов синтеза

Таблица 2. Данные рентгеновской дифрактометрии

Фаза W , кДж		SiC	Si	C
	1. 10,5 кДж	Содержание, %	60,0	24,0
	ОКР, нм	35	20	10
2. 13,0 кДж	Содержание, %	73,0	19,0	8,0
	ОКР, нм	70	80	20
3. 19,0 кДж	Содержание, %	80,0	13,0	7,0
	ОКР, нм	75	65	35
4. 29,7 кДж	Содержание, %	90,0	3,5	6,5
	ОКР, нм	90	40	20

Характер XRD-картин и совокупность когерентных рефлексов различной интенсивности показывают практическое отсутствие в продукте синтеза рентгеноаморфной составляющей и свидетельствуют о присутствии нескольких кристаллических фаз, одних и тех же во всех четырех случаях. Расчеты показали, что во всех случаях продукт плазгодинамического синтеза состоит из четырех

«ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК»

кристаллических фаз, кристаллографические параметры которых наиболее точно соответствуют следующим структурным моделям: кубический карбид кремния β -SiC, пространственная группа (space group) $SPGR - F-43m \{216\}$; кубический кремния cSi, $SPGR - F-43/d-32/m \{227\}$; графит gC, $SPGR - P6-3mc \{186\}$; углеродные луковичные структуры C-Onions, $SPGR - P6-3mc \{186\}$.

Согласно расчетным данным (таблица 2), наибольшее массовое содержание в продукте имеет фаза кубического карбида кремния. Причем с увеличением подводимой к ускорителю энергии W происходит существенное повышение содержания SiC за счет снижения содержания кристаллического кремния, т.е. более эффективное карбидообразование (рисунок 2). Однако при этом содержание углеродных фаз в продукте уменьшается незначительно в диапазоне W от 13,5 кДж до 29,7 кДж. Это объясняется закономерным увеличением количества углерода, эродируемого с поверхностей графитового центрального электрода и ускорительного канала при увеличении тока, мощности и подведенной энергии ускоряемого сильноточного разряда. Кроме того, оценочные расчеты показывают устойчивую тенденцию роста средних размеров областей когерентного рассеяния (ОКР), что говорит о увеличении размеров кристаллитов продукта синтеза. Повышение энергетики процесса обеспечивает увеличение P, t -параметров плазмы в ускорительном канале, более полную ионизацию прекурсоров и участие их в плазмохимическом образовании карбида кремния. В то же время повышаются P, t -параметры и в индуцированном у медной преграды скачке уплотнения, где скорость массопереноса становится дозвуковой, замедляется теплоотвод от массы жидкофазного продукта синтеза, повышается длительность этапа кристаллизации и роста кристаллитов распыляемого материала.

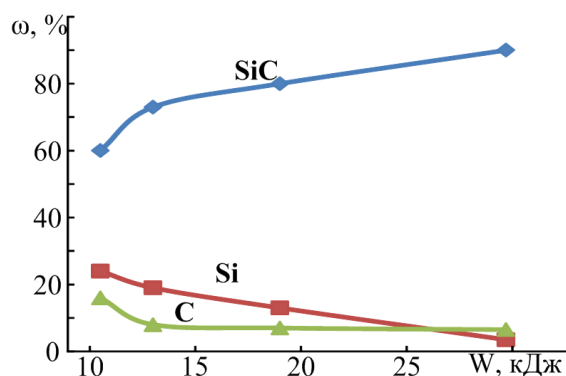


Рис. 2. Зависимость фазового состава от энергетики плазменной струи

Таким образом, по результатам анализа порошкообразного продукта методами рентгеновской дифрактометрии показана возможность плазмодинамического синтеза карбида кремния и зависимость фазового состава и размеров частиц от энергии плазменной струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harris G.L. Properties of Silicon Carbide. – London: NSPEC, Institution of Electrical Engineers, 1995. – 282 p.
2. Willander M., Friesel M., Wahab Q. Silicon carbide and diamond for high temperature device applications // Journal of materials science: materials in electronics. – 2006. – V. 17. – P. 1-25.
3. Andrievski R.A. Synthesis, structure and properties of nanosized silicon carbide // Reviews on advanced materials science. – 2009. – V.22. – P. 1-20.
4. Сивков А.А., Никитин Д.С., Пак А.Я., Рахматуллин И.А. Прямой плазмодинамический синтез ультрадисперсного карбида кремния // Письма в ЖТФ. – 2013. – Том 39, вып. 2. – С. 15-20.