

УДК 66.088, 537.523

ПРИМЕНЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРА ДЛЯ СИНТЕЗА В ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ ПОРОШКОВ ТИТАНА И НИТРИДА БОРА

© 2023 г. Т. Э. Гаянова^{а, *}, В. Д. Степахин^а, Е. А. Образцова^а, Е. В. Воронова^а, Н. Н. Скворцова^а

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

*E-mail: tatyana gayanova97@gmail.com

Поступила в редакцию 20.07.2022 г.

После доработки 25.07.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Рассмотрены особенности применения карборана в качестве катализатора в синтезе частиц микро- и нано размеров в процессах, инициируемых излучением гиротрона в смесях порошков титана и нитрида бора (с гексагональной и кубической структурой). Определены пороговые условия для развития процессов, массы и состав полученных веществ.

Ключевые слова: плазмохимия, гиротрон, синтез структур микро- и наноразмеров

DOI: 10.56304/S2079562922050153

1. ВВЕДЕНИЕ

Структуры, полученные из нитрида бора, находят применение в различных отраслях промышленности, техники, электроники, медицины. Например, производство продукции с таким покрытием востребовано для выполнения черновой и финишной обработки деталей в тяжелом машиностроении и автомобилестроении. Аэрогель нитрида бора послужил основой для создания источника белого света на основе лазера [1], наномеш нитрида бора используется в катализе [2]. В последние годы широкозонный слоистый гексагональный нитрид бора получил признание за его широкие перспективы применения для обнаружения нейтронов и обработки квантовой информации. [3]. В производстве высококристаллических нанотрубок из нитрида бора малого диаметра используется катализатор – водород [4]. Однако в плазмохимическом синтезе с использованием излучения мощного гиротрона невозможно использовать водород из-за высокой взрывоопасности, поэтому в качестве катализатора используется карборан ($C_2H_{10}B_{12}$), включающий большое количество водорода [5]. В статье представлены особенности применения карборана в качестве катализатора в синтезе частиц микро- и нано размеров в процессах, инициируемых излучением гиротрона в смесях порошков титана (Ti) и нитрида бора (BN) с кубической (–с–) и гексагональной (–h–) структурой.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент проводился на плазмохимической установке с мощным гиротроном в смесях порошков BN кубической и гексагональной структур (рис. 1) с Ti. Описание установки приведено в [6]. Образец формировался по объему. Объем титана при насыпке порошка составлял 0.5 мл, нитрида бора 2 мл. Процентное соотношение по объему составляет 80/20. Карборан ($C_2H_{10}B_{12}$) в малом количестве либо посыпался сверху порошка, либо подмешивался в сам порошок (рис. 2, рис. 3). Смесь в реакторе по высоте и массе формировалась таким образом, чтобы с точки зрения СВЧ пробоя создавались одинаковые условия. Описание параметров СВЧ пробоя и характеристики плазмохимических процессов в реакторе для смесей порошков представлено в работах [5–8]. На рис. 4 и 5 представлен общий вид исходных смесей и смесей после синтеза. Количество импульсов гиротрона на каждую смесь определялось из расчета соблюдения внесения одинакового количества энергетического вклада. На каждую смесь было подано от 15 до 22 импульсов гиротрона длительностью 2–6 мс, мощностью 200–300 кВт.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате протекающего процесса в плазмохимическом реакторе происходил синтез вторичных веществ, которые осаждались в реакторе. В результате синтеза происходило полное изменение структуры порошковых смесей с увеличени-

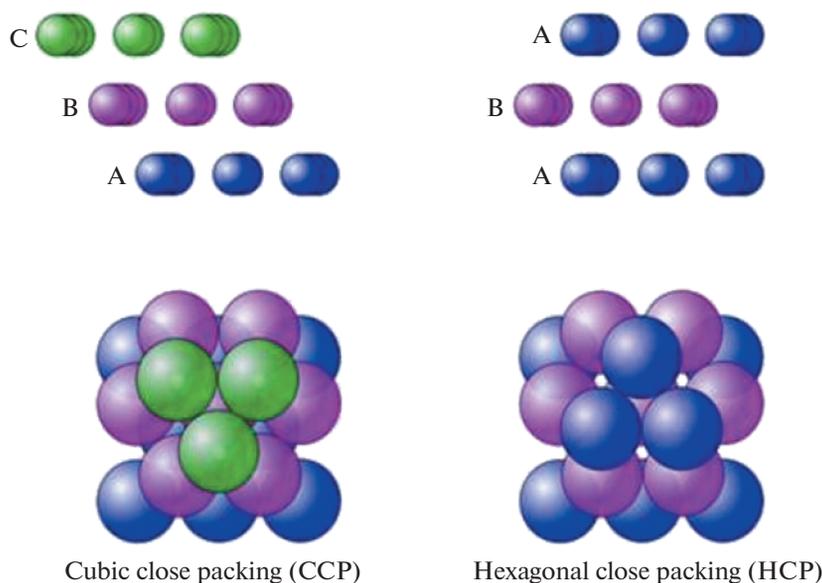


Рис. 1. Кубическая и гексагональная структуры [9].



Рис. 2. Схема насыпки порошка Ti(20%)/BN-(карборан сверху).

ем массы. При использовании кубического нитрида бора наибольшее увеличение происходило в смеси Ti(20%)/-с-BN (карборан сверху) – в 2.25 раза, для гексагонального в смеси Ti(20%)/-h-BN (карборан сверху) в 1.66 раза (табл. 1). ЭДС карта распределения частиц показывает, что в образце присутствуют большие частицы титана, размером порядка десятков нанометров (рис. 6, рис. 7). Также присутствуют более мелкие частицы азота и кислорода. В физико-химических анализах был обнаружен окисел титана. Это может свидетельствовать об участии газа в реакторе в процессах синтеза.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было выяснено, что карборан в смесях с титаном и нитридом бора способствует развитию экзотермических процессов смеси и увеличивает выход материала на стенки и дно подложки реактора. Разница в массе определяется разной насыпной плотностью смесей. Наиболее эффективно синтез происходит в смесях с кубическим нитридом бора -с-BN с насыпкой карборана сверху. В данной смеси при помощи рамановской спектроскопии были обнаружены гексагональные структу-



Рис. 3. Схема насыпки порошка Ti(20%)/BN-(карборан перемешан).

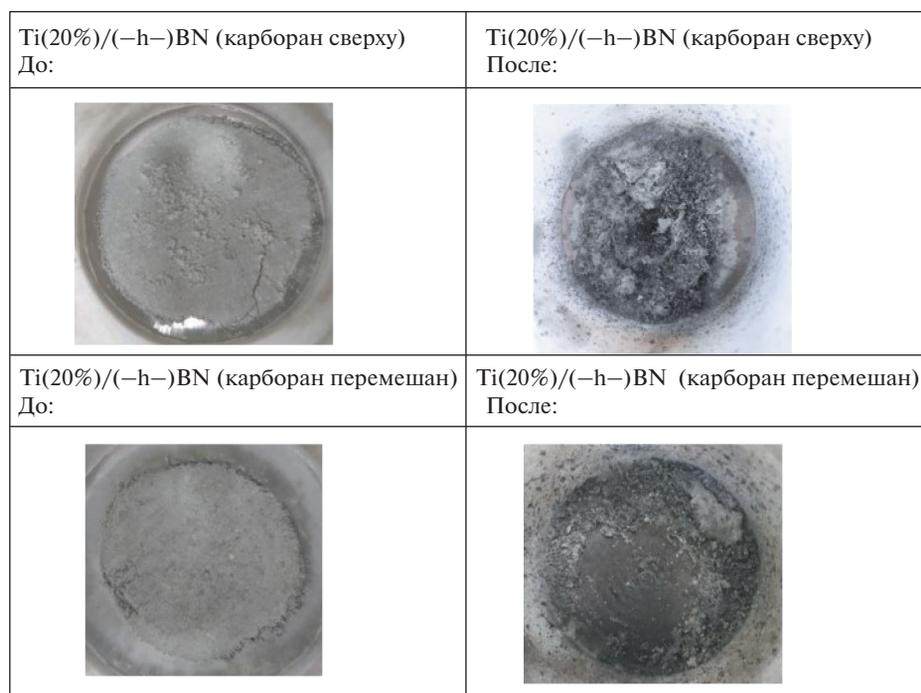


Рис. 4. Общий вид исходных смесей и смесей после синтеза для (-h-)BN.

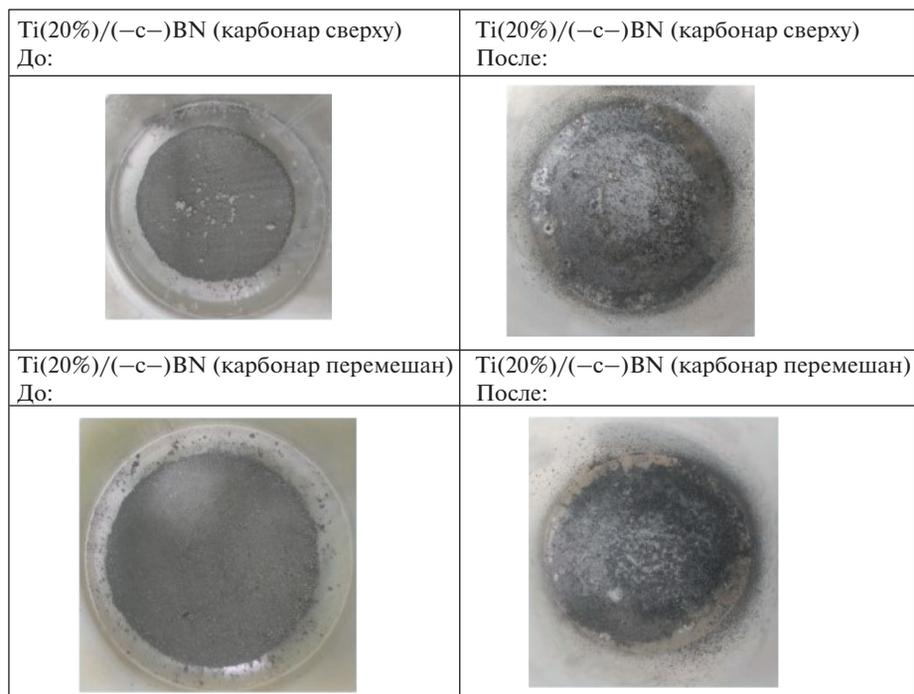


Рис. 5. Общий вид исходных смесей и смесей после синтеза для (-c-)BN.

Таблица 1. Изменение массы после синтеза

	Масса порошка после синтеза, г	Масса порошка до синтеза, г	Количество импульсов, шт	Увеличение массы, раз
Ti(20%)/(-c-)BN (C ₂ H ₁₀ B ₁₂ сверху)	5.891(3.2)	2.609	15	2.25
Ti(20%)/(-c-)BN (C ₂ H ₁₀ B ₁₂ перемешан)	3.353 (1.79)	2.609	21	1.28
Ti(20%)/(-h-)BN (C ₂ H ₁₀ B ₁₂ сверху)	2.373	1.426	25	1.66
Ti(20%)/(-h-)BN (C ₂ H ₁₀ B ₁₂ перемешан)	1.922	1.426	22	1.35

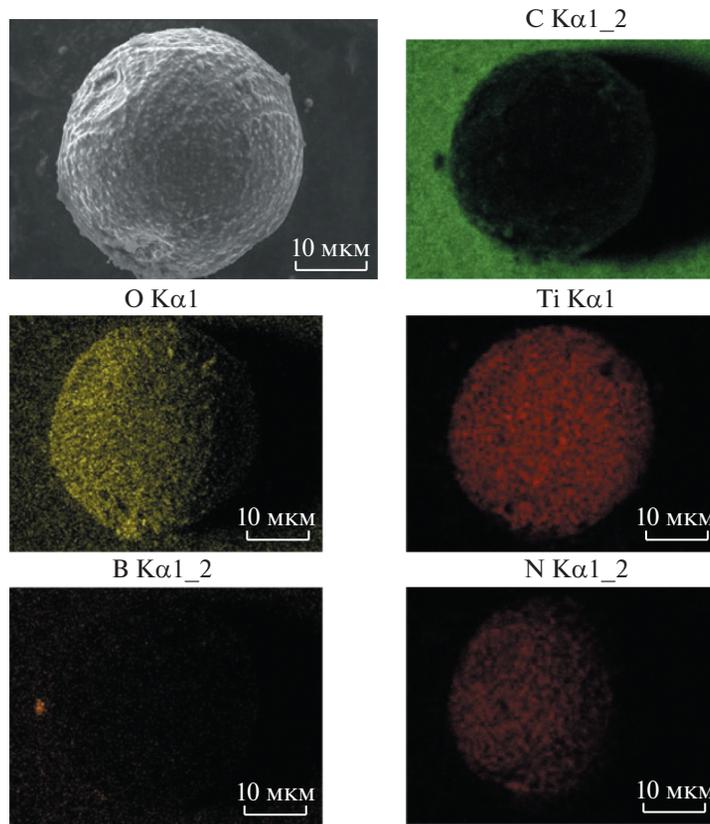


Рис. 6. РЭМ изображение и карты распределения химических элементов для (-с-)BN.

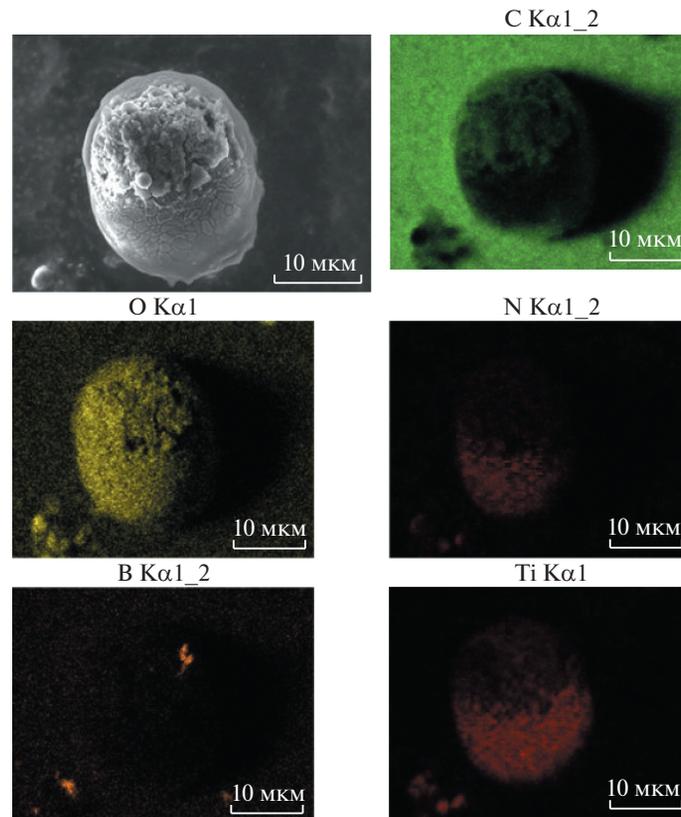


Рис. 7. РЭМ изображение и карты распределения химических элементов для (-h-)BN.

ры (–h–), что соответствует правилу “ступенчатых переходов” Оствальда. Исследование фазовых переходов в таких системах будет продолжено.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2022 “Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении”.

Коллектив выражает благодарность руководителю исследовательской работы Н.Г. Гусейн-заде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Schütt F., Zapf M., Signetti S. et al. // Nat. Commun. 2020. V. 11 (1). P. 1437.
2. Corso M. et al. // Science 2004. V. 303 (5655). P. 217–220.
3. Yang Y. et al. // Materials. 2022. V. 15 (13). P. 4396. <https://doi.org/10.3390/ma15134396>
4. Kim K.S. et al. // ACS Nano. 2014. V. 8 (6). P. 6211–6220.
5. Skvortsova N.N. et al. // Ceram. Int. 2021. V. 47 (3). P. 3978–3987.
6. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D.J. // J. Nanophotonics. 2016. V. 10 (1). P. 012520.
7. Zakletskii Z.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2055 (1). P. 012013.
8. Voronova E.V. et al. // Phys. At. Nucl. 2021. V. 84 (10). P. 1761–1764.
9. Sphere Packing: Википедия. Свободная энциклопедия. https://en.wikipedia.org/wiki/Sphere_packing.

Application of a Catalyst for Synthesis in Processes Initiated by Radiation of a Gyrotron in Mixtures of Titanium and Boron Nitride Powders

T. E. Gayanova¹, *, V. D. Stepakhin¹, E. A. Obratsova¹, E. V. Voronova¹, and N. N. Skvortsova¹

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: tatyaganayanova97@gmail.com

Received July 20, 2022; revised July 25, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—The features of the use of carborane as a catalyst in the synthesis of particles of micro- and nano sizes in processes initiated by radiation of a gyrotron in mixtures of titanium and boron nitride powders (with hexagonal and cubic structure) are considered. The threshold conditions for the development of processes and the mass and composition of the obtained substances are determined.

Keywords: plasma chemistry, gyrotron, synthesis of micro- and nanosize structures