ПОЛУЧЕНИЕ СОДЕРЖАЩИХ БОР-КРЕМНИЙ НАНОЧАСТИЦ

В.Беклемышев[1], В.Пустовой[2], С.Коровин[2], А.Владимиров[2], У.Мауджери[3]
info@institute-nano.ru

Одно из направлений нанотехнологии – получение наноматериалов и наночастиц, обладающих качественно новыми функциональными свойствами, в том числе соединений бора, используемых при диагностике и лечении различных заболеваний. Перспективно, в частности, применение борсодержащих наночастиц для борнейтронозахватной терапии (БНЗТ) онкологических заболеваний.

При БНЗТ высокую эффективность могут проявлять наноструктуры и наночастицы, доставляющие в клетки опухоли необходимые концентрации бора для обеспечения лечебного эффекта [1–3].

Такие соединения и частицы получают плазмохимическим синтезом, лазерно-индуцированным пиролизом с использованием газовых реагентов: трихлорида бора, моносилана, водорода, диборана. Однако применение последних двух в качестве реакционных компонентов усложняет технологический процесс и снижает его безопасность, что ограничивает возможности получения борсодержащих частиц. Эти способы также не позволяют достаточно эффективно контролировать размерность получаемых частиц, степень их дисперсности, достигать требуемую размерность и чистоту.

Для получения борсодержащих наночастиц авторами статьи проведена работа по расширению технологических возможностей метода лазерно-индуцированного пиролиза [4]. Предлагаемый вариант позволяет получать содержащие бор-кремний наночастицы размером 5–30 нм с необходимым для БНЗТ повышенным содержанием бора.

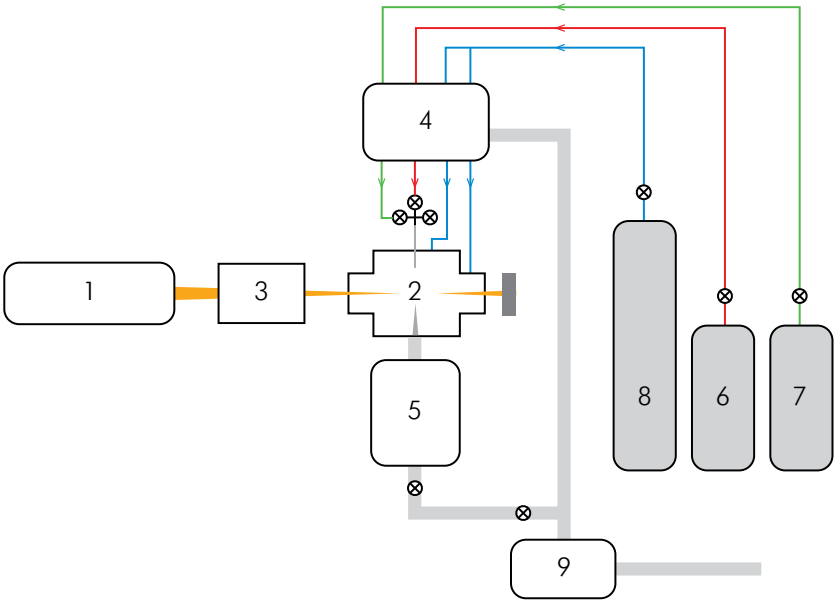

Рис.1. **Принципиальная схема установки**

Получение таких частиц обеспечивается подачей в проточный реактор реакционной газовой смеси, содержащей моносилан (SiH_4), трихлорид бора (BCl_3) и буферный газ гелий (He), и индуцировании при давлении ниже атмосферного пиролиза газовой смеси непрерывным излучением CO_2-лазера.

На рис. 1 приведена принципиальная схема установки для получения содержащих бор-кремний наночастиц, состоящей из следующих приборов и оборудования: CO_2-лазерного излучателя непрерывного действия (1); проточного реактора (2), снабженного реакционной кварцевой трубкой с капилляром для подачи газовой смеси; системы фокусирующих линз (3); панели газонапуска (4) с ротаметрами и регуляторами расхода; блока со сменными фильтрующими ячейками для сбора наночастиц (5); баллонов с моносиланом (6), трихлоридом бора (7), буферным газом (8); вакуумного насоса (9).

Синтез наночастиц, содержащих бор-кремний, осуществлялся в струе смеси газов при воздействии на нее излучения

[1] Институт прикладной нанотехнологии (Зеленоград).
[2] Институт общей физики РАН.
[3] Фонд Сальваторе Мауджери (Италия).

CO_2-лазера (выходная мощность – 70 Вт, длина волны λ=10,6 мкм). При этих условиях происходит разложение моносилана на активные преципитаты SiHx и трихлорида бора с образованием связей бор-кремний (B-Si). Сбор образующихся наночастиц проводился в фильтрующем блоке в атмосфере буферного газа.

Для получения наночастиц требуемых размеров и с необходимым содержанием бора процесс осуществлялся при оптимальных соотношениях газов, давлении газовой смеси и плотности мощности лазерного излучения. Производительность процесса составила примерно 650 мг/ч наночастиц, причем линейный размер их, определявшийся просвечивающей электронной микроскопией на электронном микроскопе TEM "LEO912 AB OMEGA" (рис.2), составил 5–30 нм.

Для исследования качественного состава полученных наночастиц использовались спектрометр Quantera SXM с монохроматизированным рентгеновским источником AlKα (1486,61 эВ) (метод рентгеновской–фотоэлектронной спектроскопии) и полусферический анализатор энергий электронов. Рентгеновские фотоэлектронные спектры кремния и бора исследовались на нанесенном слое наночастиц в трех областях на подложке 8x8 мм. Линейный размер каждой области составлял 100 мкм.

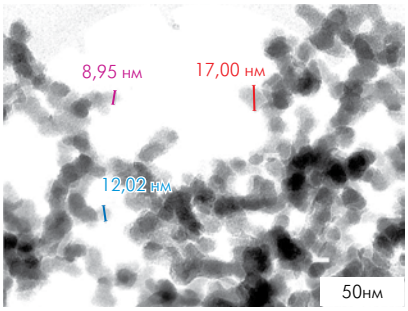

Рис.2. **Изображения содержащих бор-кремний наночастиц**

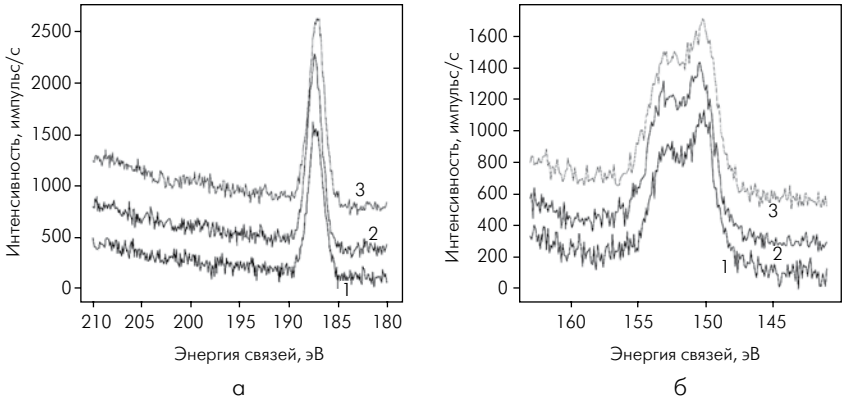

Рис.3. **Рентгеновские фотоэлектронные спектры для содержащихся в наночастицах: а – бора (B1s); б – кремния (Si2s) (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия)**

Фотоэлектронные спектры бора (уровень B1s) и кремния (уровень Si2s), использовавшиеся для расчета их атомных концентраций (ат.%) в наночастицах, получены при энергии пропускания анализатора, равной 55 эВ. Концентрации содержащихся в наночастицах кремния и бора определялись с использованием программного обеспечения спектрометра, учитывающего факторы элементной чувствительности и геометрию съемки, и вычислялись интегральные интенсивности спектров уровней B1s и Si2s.

Рентгеновские фотоэлектронные спектры содержащихся в наночастицах бора и кремния приведены на рис.3. Представлены спектральные линии для трех исследованных областей (1–3), отражающие зависимости интенсивности фотоэлектронов (импульс/с) от энергии связи электронов (эВ) в образующих молекулы кремния и бора внутренних оболочках атомов.

По линиям B1s и Si2s для исследованных областей (1–3) установлено следующее содержание (ат.%) бора и кремния: 1: бор – 60,38 и кремний – 39,62; 2: бор – 61,32 и кремний – 38,68; 3: бор – 61,14 и кремний – 38,86.

Таким образом, при реализации предлагаемого варианта способа лазерно-индуцированного пиролиза были получены наночастицы, содержащие бор-кремний, размером 5–30 нм с концентрацией бора более 60 ат.%.

Учитывая перспективность БНЗТ, можно прогнозировать, что разработанный способ получения содержащих бор-кремний наночастиц, с указанной размерностью и повышенным содержанием бора, представит практический интерес при создании препаратов для терапии онкологических заболеваний.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность сотрудникам "Института прикладной нанотехнологии" И.Махонину и К.Филиппову за участие в работе и активное обсуждение полученных результатов.

Литература

1. **Сиваев И.Б., Брегадзе В.И.** Бор-нейтронозахватная терапия рака. Химический аспект. – Российский химический журнал, 2004, т.XLVIII, №4, с.109–125.

2. Application WO 2005/094884 A2 "Boron containing nanoparticles targeted to T-cells", 13.10.2005.

3. Application US № 2005/0180917 A1 "Delivery of neutron capture elements for neutron capture therapy", 18.08. 2005.

4. **A.Vladimirov, S.Korovin, A.Surkov, V.Pustovoy, E.Kelm.** Synthesis of Luminescent Si Nanoparticles Using the Laser-Induced Pyrolysis. – Laser Physics, 2011, v.21, №4, p.830–835.