DOI: https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2025.1.5

УДК 620.3
ББК 30.37

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ БОРОЗАМЕЩЕННЫХ ФУЛЛЕРЕНОВ [1]

Антон Раджабович Эль Занин

Студент, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
nmtb-201_341523@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Сергей Владимирович Борознин

Доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий кафедрой судебной экспертизы и физического материаловедения,
Волгоградский государственный университет
boroznin@volsu.ru
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. В настоящей работе был проведен обзор существующих методов получения борозамещенных фуллеренов. Для этих целей используют метод лазерного испарения, электродуговой метод и метод химического осаждения из газовой фазы. В статье приводятся схемы применяемых установок, используемое оборудование и материалы, описаны основные операции получения рассматриваемых соединений для каждого метода. Описаны способы выделения целевого продукта из получаемой фуллеренсодержащей сажи и используемые при этом реактивы. Проведено сравнение различных подходов к получению борозамещенных фуллеренов по ряду критериев, среди которых количество получаемого продукта, стоимость метода и необходимость наличия специального оборудования. В выводе отмечены преимущества и недостатки каждого метода, а также их применимость в исследовательской или промышленной деятельности.

Ключевые слова: борозамещенные фуллерены, методы синтеза, лазерное испарение, электродуговой метод, химическое осаждение из газовой фазы.

© Эль Занин А.Р., Борознин С.В., 2025

Введение

Фуллерены представляют собой углеродные наноструктруры в форме выпуклых многогранников, в вершинах которых расположены атомы углерода в состоянии sp^2-гибридизации. С момента своего открытия в 1985 году [15] они продолжают привлекать внимание исследователей из-за своих уникальных свойств. На сегодняшний день было получено большое число представителей данного класса соединений, начиная от малых фуллеренов, например, самого маленького возможного фуллерена C_{20} [23] и C_{28}, полученного в виде достаточно стабильного эндоэдрального комплекса с металлами [10], и заканчивая гигантскими фуллеренами, содержащими сотни атомов углерода [21]. Отдельно выделяют углеродные нанолуковицы, представляющие собой вложенные друг в друга фуллерены различного диаметра [19; 22] (рис. 1), а также структуры, занимающие промежуточное положение между фуллеренами и нанотрубками, называемые “fullertubes” и представляющие собой достаточно короткие нанотрубки с концами, замкнутыми фуллереновыми полусферами (рис. 2). В отличие от нанотрубок, данные структуры имеют строго определенную молекулярную массу, а также являются растворимыми [13]; такие свойства характерны для фуллеренов.

Допирование углеродных наноструктур бором позволяет управлять их геометрическими, электронно-проводящими, оптическими свойствами. Как известно, бор по отношению к полупроводникам IVA группы (C, Si, Ge) является акцепторной примесью [11]. Большой интерес исследователей сегодня вызывают различные углеродные материалы с примесями бора: бороуглеродные нанотрубки [5], бороуглеродные нанослои [1]. Борозамещенные фуллерены в этом плане также не являются исключением – на сегодняшний день имеется большой пласт исследований, посвященных

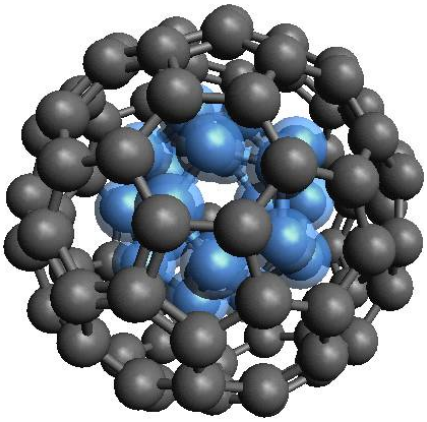


Рис. 1. Нанолуковица $C_{20}@C_{80}$

Примечание. Серым цветом обозначен фуллерен C_{80}, синим – вложенный в него фуллерен C_{20}.

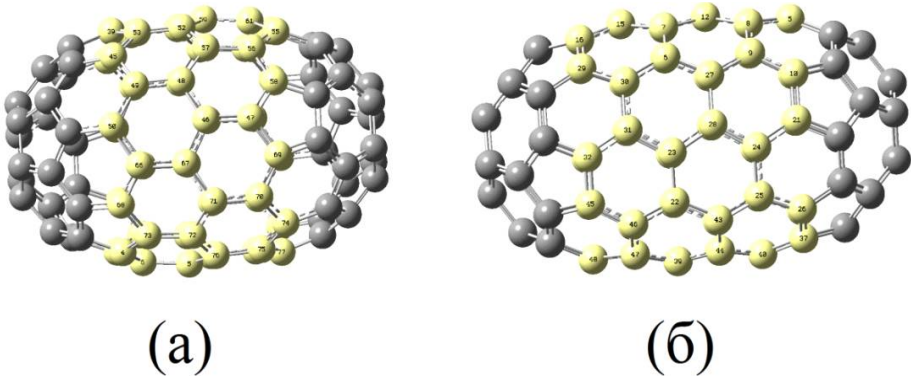


Рис. 2. Фуллерены C_{96} (D_{3d}) и C100 (D_{5d}), которые могут быть отнесены к классу “fullertubes”

Примечание. Желтым цветом обозначена часть, представляющая собой свертку листа графена.

этой теме, выполненных с привлечением как теоретических, так и экспериментальных методов. В связи с большой практической значимостью таких соединений систематизация информации о способах их получения является важной и актуальной задачей. Соответственно, **целью** настоящей работы является обзор существующих методов получения борозамещенных фуллеренов.

Обзор методов получения борозамещенных фуллеренов

Метод лазерного испарения. Первые работы, посвященные получению борозамещенного фуллерена C_{60}, относятся к началу 90-х годов. Отметим работу [12], написанную в соавторстве с Р. Смолли, одним из первооткрывателей фуллеренов, получившим за свои исследования Нобелевскую премию по химии (1996 г.). В данной работе сообщалось о получении борозамещенных фуллеренов путем лазерного испарения композита на основе графита и нитрида бора. В результате образовывались фуллерены, в которых один или несколько атомов углерода замещены атомами бора. Исследование полученных кластеров проводилось методами ионного циклотронного резонанса. Об образовании именно фуллеренов судили по числу атомов в кластерах: было отмечено отсутствие кластеров с нечетным числом атомов, чаще всего наблюдались кластеры с числом атомов 50, 60, 70.

В работе [20] приводится схематичное изображение установки, позволяющей проводить синтез подобных структур (рис. 3). Источником излучения выступал импульсный твердотельный лазер Nd:YAG с длиной волны излучения 532 нм, выходной мощностью 2 Дж/см^2 за импульс и частотой повторения 10 Гц. Лазерный луч был направлен на мишень из композита, выполненного из графита и карбида бора B_4C либо карбонитрида бора BC_2N. Процесс лазерного испарения происходил при температуре 1200 °C в атмосфере аргона или азота, которые подавались под давлением 500 мм рт. ст. Мишень, изготовленная в форме стержня, медленно (с частотой 10 оборотов в минуту) вращалась в ходе процесса. Образующиеся продукты осаждались на подложки из Si (100). Проведенное в работе методом масс-спектрометрии исследование образующихся на подложках структур показало, что при использовании в качестве материала мишени композита из графита и карбида бора и проведении лазерного испарения в атмосфере аргона образуется борозамещенный фуллерен $C_{59}B$. Использование в качестве материала мишени композита из графита и карбонитрида бора или проведение лазерного испарения в атмосфере азота при любом материале мишени приводило к образованию боразотозамещенного фуллерена $C_{58}BN$.

Методом лазерного испарения также удалось получить борозамещенный малый фуллерен $C_{27}B$ в виде его эндоэдрального ком-

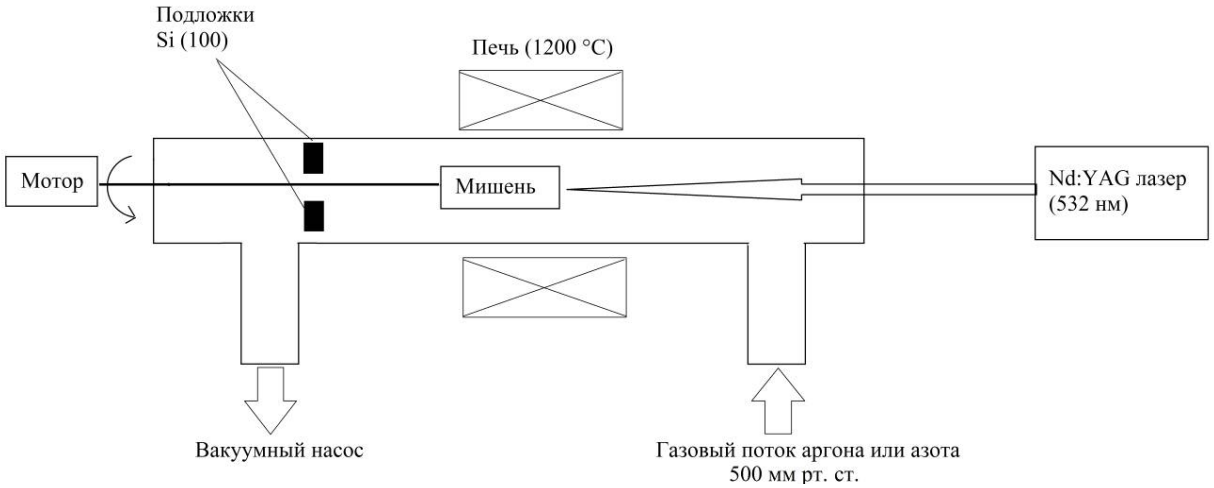


Рис. 3. Схематичное изображение установки для синтеза борозамещенных фуллеренов методом лазерного испарения

Примечание. Источник: [20].

плекса с ураном (рис. 4) [17]. Отмечается, что это наиболее распространенный из обнаруженных в ходе исследования комплексов из семейства $U@C_{2n-1}B$.

Электродуговой метод. Электродуговой способ получения фуллеренов, также называемый методом Кретчмера-Хаффмана [14], позволяет получать достаточно большие количества чистых фуллеренов, что в настоящий момент делает его наиболее экономически обоснованным для промышленного применения. Его сущность заключается в сжигании графитовых электродов в ходе дугового разряда в атмосфере гелия.

Добавление в материал электродов соединений бора (нитрида или карбида) или чистого бора позволяет получать борозамещенные фуллерены электродуговым методом, что было установлено авторами работы [18]. Наилучшие результаты достигаются, если добавляемое в графитовые стержни количество боросодержащего вещества составляет 10–15 % по массе от общей массы стержня. На рисунке 5 приводится последовательность процессов при получении боросодержащих фуллеренов электродуговым методом. Экстракция фуллеренов из фуллеренсодержащей сажи

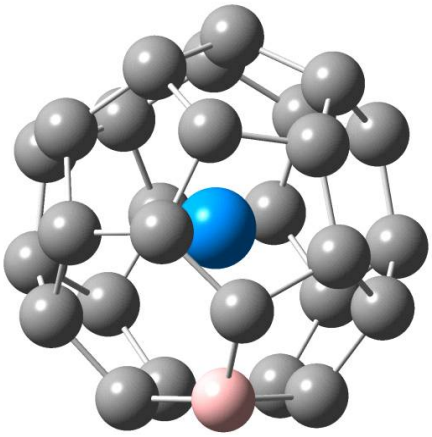


Рис. 4. Геометрическая структура $U@C_{27}B$

Примечание. Серым цветом обозначены атомы углерода, бежевым – атом бора, синим – атом урана.



Рис. 5. Схема получения боросодержащих фуллеренов

Примечание. Источник: [18].

производилась в экстракторе Сокслета при температуре 60 °C и пониженном давлении 30 мбар в атмосфере аргона. Чистые фуллерены чаще всего экстрагируют с помощью неполярных растворителей, таких как толуол и сероуглерод; для экстракции борозамещенных производных предлагается использовать полярный растворитель пиридин. Последующие процедуры экстракции выполнялись в условиях сухого бокса при отсутствии влажности и доступа кислорода. Экстракция с использованием сероуглерода CS_2 необходима для разделения недопированных и допированных фуллеренов. Так, экстракт 1 содержал преимущественно фуллерен C_{60} и некоторые высшие фуллерены, содержание гетерофуллеренов в нем пренебрежимо мало. Экстракт 2, полученный путем экстракции остатка с использованием пиридина, содержал относительно большое количество борозамещенных фуллеренов, преимущественно $C_{59}B$ и $C_{69}B$ (рис. 6); также было отмечено присутствие таких соединений, как $C_{87}B$, $C_{89}B$, $C_{91}B$, $C_{93}B$, $C_{95}B$.

В работе [7] авторы использовали два электрода, один изготовленный из карбида бора и графита, а второй – из высокочистого графита. В результате проведения электродугового синтеза им удалось получить борозамещенные фуллерены $C_{60-n}B_n$ и $C_{70-n}B_n$ (n = 1, 2, 3) (см. рис. 7). Экстракцию впоследствии проводили в атмосфере азота с использованием неполярного растворителя о-ксилола. В работе [6] тот же коллектив авторов провел подобное исследование, но для экстракции использовали CS_2. Было отмечено, что $C_{58}B_2$ и $C_{68}B_2$ удалось экстрагировать впервые. Также было установлено, что при достижении достаточно большого тока дуги борозамещенные фуллерены перестают формироваться, но повышается количество высших фуллеренов.

Химическое осаждение из газовой фазы. Химическое осаждение из газовой фазы крайне широко применяется для получения различных углеродных наноматериалов начиная от наноалмаза и заканчивая графеном [16]. Химическое осаждение из газовой фазы – один из наиболее распространенных способов получения углеродных нанотрубок, позволяющий получать большие количества конечного продукта [5].

Для получения борозамещенных фуллеренов чаще всего используют плазменно-химическое осаждение из газовой фазы. Реакция в таком случае протекает в потоке высокочастотной плазмы.

Существуют различные варианты установок, позволяющих проводить подобный синтез. Отечественные ученые разработали реактор (см. рис. 8) [8], в котором возможно получение как гетерофуллеренов, так и эндоэдральных фуллеренов, в частности, эндоэдральных комплексов со скандием [8]. Примечательно, что такая установка позволяет проводить синтез при атмосферном давле-

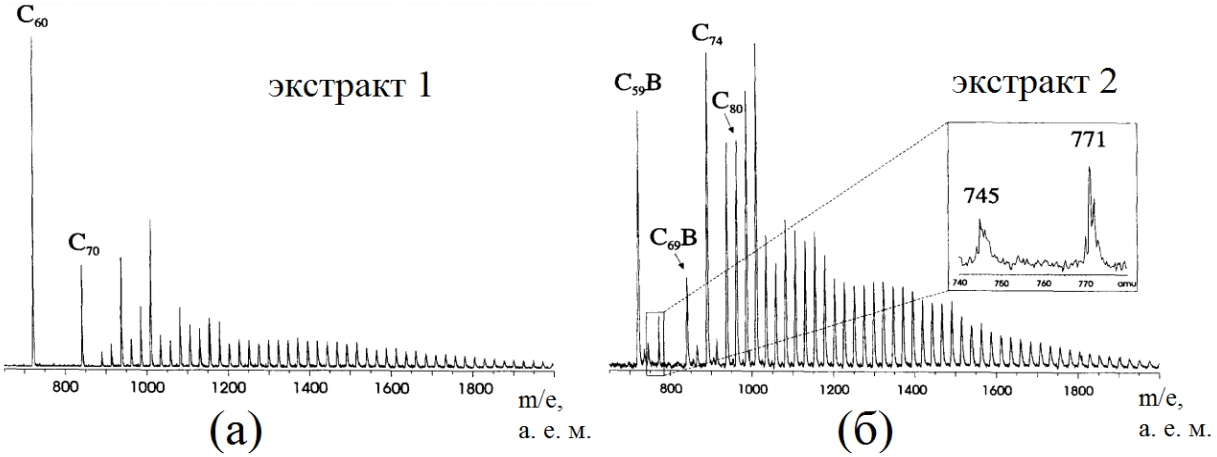


Рис. 6. Масс-спектры, демонстрирующие преимущественное присутствие чистых фуллеренов в экстракте 1 (*а*) и наличие в достаточных количествах борозамещенных фуллеренов $C_{59}B$ и $C_{69}B$ в экстракте 2 (*б*)

Примечание. Источник: [18]. На вставке на изображении (*б*) обозначены пики, соответствующие аддуктам борозамещенного фуллерена $C_{59}B$ и продуктов распада пиридина (с массами 26 и 52 а. е. м.).

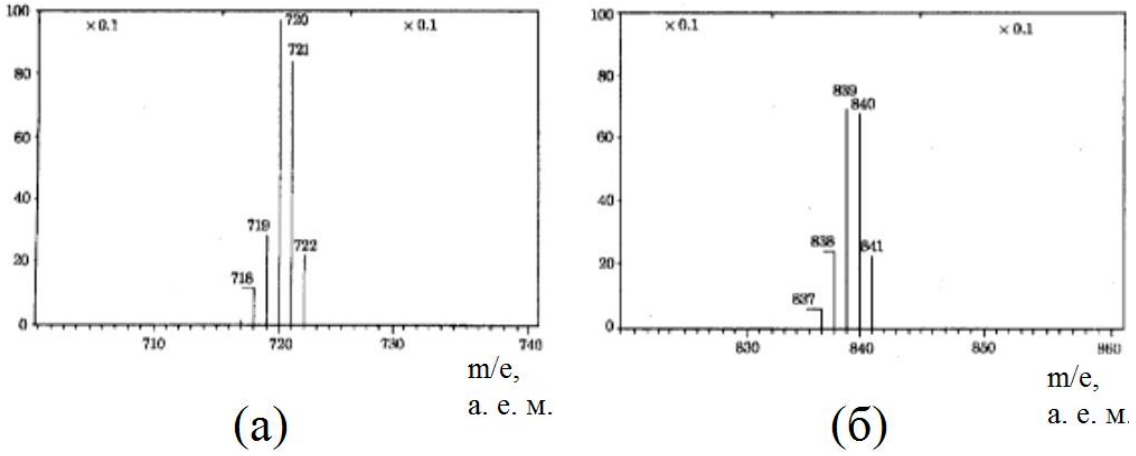


Рис. 7. Масс-спектры, соответствующие областям вблизи пиков фуллеренов C_{60} (*а*) и C_{70} (*б*)

Примечание. Источник: [16]. На изображении (*а*) пик на массе 720 а. е. м. соответствует фуллерену C_{60}, на массе 719 а. е. м. – фуллерену $C_{59}B$, на массе 718 а. е. м. – $C_{58}B_2$. На изображении (*б*) пик на массе 840 а. е. м. соответствует фуллерену C_{70}, на массе 839 а. е. м. – фуллерену $C_{69}B$, на массе 838 а. е. м. – $C_{68}B_2$, на массе 837 а. е. м. – $C_{67}B_3$.

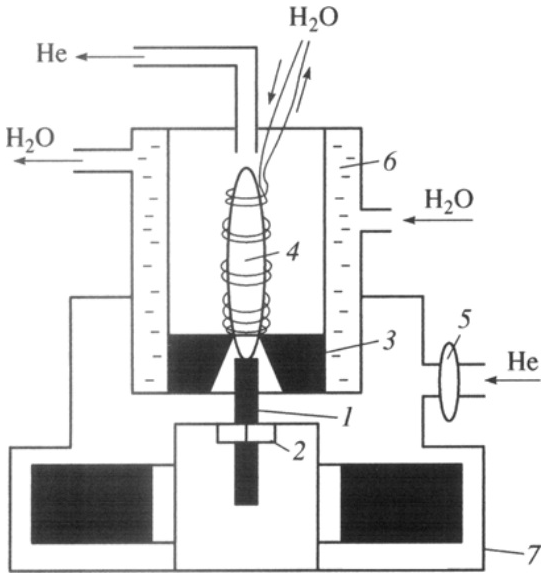


Рис. 8. Внешний вид плазменно-химического реактора для получения фуллеренов:

1 – внутренний графитовый электрод; *2* – графитовые контакты; *3* – внешний электрод; *4* – поток плазмы; *5* – расходомер; *6* – стенки камеры синтеза; *7* – понижающий трансформатор

Примечание. Источник: [8].

нии. Температура вблизи внешнего электрода составляет 5 000 К, плазменная струя достигает длины 75 см при токе дуги 500 А. На такой установке исследователям удалось получить фуллерен BC_{59} путем введения в углеродно-гелиевую плазму порошка оксида бора B_2O_3 [9]. Было показано, что в фуллереновой смеси содержалось более 11 % борозамещенного фуллерена.

Отдельный пласт исследований посвящен получению тонких пленок допированного бором фуллерена C_{60}. Установка, используемая в работах (см. рис. 9) [24–25], уже предполагала достижения в реакционной камере вакуума. Два электрода, представляющие собой параллельно расположенные молибденовые пластины, формировали систему реактора с емкостно-связанной плазмой. В кварцевую

емкость помещался порошок фуллерена C_{60}, используемый в качестве исходного материала. Посредством масляного диффузионного насоса в камере достигалось давление 1×10^{-5} мм рт. ст. После нагревания кварцевой емкости до 773 К происходило испарение C_{60}, одновременно с этим в камеру вводилась смесь диборана B_2H_6 и водорода H_2. Далее получившаяся смесь из находящегося в газовой фазе C_{60}, водорода и диборана переводилась в состояние плазмы посредством воздействия радиочастотного (RF) излучения с частотой 13,56 МГц. Рабочее давление на этапе осаждения пленки составляло 6×10^{-2} мм рт. ст., осаждение проводилось в течение 2 ч на кремниевую подложку [24]. Полученные пленки имели толщину от 200 до 400 нм. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и Фурье-ИК спектроскопии удалось установить формирование пленки допированного бором фуллерена C_{60}.

Другая исследовательская группа [2–4] получала тонкие пленки допированного бором фуллерена C_{60} по схожему алгоритму. Используемая в этих работах установка представлена на рисунке 10. Порошок фуллерена C_{60} помещался в вольфрамовую емкость; вместо водорода в данном случае использовался аргон. Давление в камере до начала осаждения достигало значения 1×10^{-5} мм рт. ст. После введения смеси аргона и диборана рабочее давление составляло $2{,}5 \times 10^{-2}$ мм рт. ст., вместо 6×10^{-2} в работах [24–25]. Время осаждения составляло не 2 ч, а 20 мин [3]. Полученная пленка имела толщину порядка 100 нм.

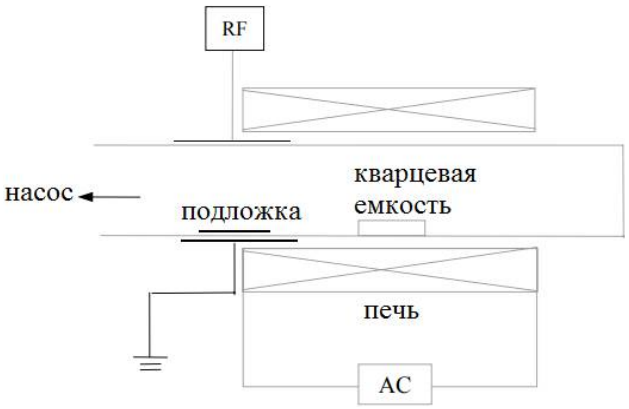


Рис. 9. Схема установки для получения пленок допированного бором фуллерена C_{60} методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы из работы

Примечание. Источник: [24].

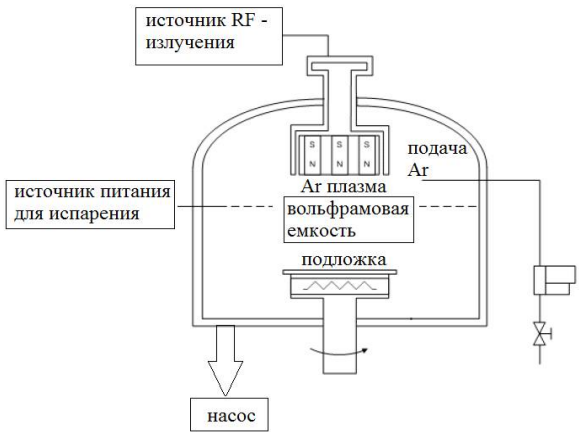


Рис. 10. Схема установки для получения тонких пленок допированного бором фуллерена C_{60} методом плазменно-химического осаждения из газовой фазы из работы

Примечание. Источник: [2].

Сравнение рассмотренных методов получения борозамещенных фуллеренов

Выше мы рассмотрели методы получения борозамещенных фуллеренов, представленные в отечественной и зарубежной литературе. Проведем их сопоставление по следующим характеристикам: количество получаемого продукта, стоимость метода, необходимость наличия специального оборудования (см. таблицу).

Заключение

Таким образом, в настоящей работе был проведен обзор существующих методов получения борозамещенных фуллеренов и проведено их сравнение по нескольким критериям: количеству получаемого продукта, стоимости метода и необходимостью наличия специального оборудования.

Можно сделать вывод, что метод лазерного испарения вероятнее всего может найти свое применение только для исследовательских задач в лабораторных условиях. Он отличается высокой стоимостью и малым количеством образующихся борозамещенных фуллеренов. Тем не менее он позволяет получать достаточно «необычные» образцы, например, малые борозамещенные фуллерены.

Электродуговой метод уже зарекомендовал себя в промышленности как дешевый способ получения больших количеств чистых фуллеренов. Он также пригоден для получения достаточно больших количеств борозамещенных фуллеренов, однако в таком случае требуется более строгий контроль условий проведения синтеза, а также, для достижения наилучшего разделения допированных и недопированных образцов, последовательное использование нескольких растворителей для проведения экстракции.

Метод плазменно-химического осаждения также позволяет получать большие количества борозамещенных фуллеренов. Достаточно жесткие условия проведения синтеза в совокупности с часто имеющим место требованием достижения вакуума приводят к удорожанию конечного продукта. Наличие отработанной технологии получения тонких пленок допированных бором фуллеренов открывают новые горизонты для применения этого метода в различных областях науки и техники.

ПРИМЕЧАНИЕ

[1] Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования и науки РФ (тема “FZUU-2023-0001”).

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education and Science of the Russian Federation (topic “FZUU-2023-0001”).

REFERENCES

1. Agnoli S., Favaro M. Doping Graphene with Boron: A Review of Synthesis Methods, Physicochemical Characterization, and Emerging Applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, vol. 4, no. 14, pp. 5002-5025. DOI: 10.1039/C5TA10599D

2. Arie A.A., Jeon B.J., Lee J.K. Preparation of Boron Doped Fullerene Film by a Thermal Evaporation Technique using Argon Plasma Treatment and Its Electrochemical Application. *Carbon Letters*, 2010, vol. 11, no. 2, pp. 127-130.

3. Arie A.A., Lee J.K. Effect of Boron Doped Fullerene C_{60} Film Coating on the Electrochemical Characteristics of Silicon Thin Film Anodes for

Сравнение различных методов получения борозамещенных фуллеренов

Характеристика	Метод лазерного испарения	Электродуговой метод	Метод плазменно-химического осаждения из газовой фазы
Количество получаемого продукта	Малое	Большое	Большое
Стоимость метода	Высокая	Низкая	Средняя
Необходимость наличия специального оборудования	Требуется подбор состава атмосферы и материала мишени	Требуется подбор состава электродов, вещества для экстракции и тока дуги	Требуется конструирование плазменно-химического реактора, выдерживающего достаточно жесткие условия синтеза; часто требуется достижение вакуума

Lithium Secondary Batteries. *Synthetic Metals*, 2011, vol. 161, no. 1-2, pp. 158-165. DOI: 10.1016/j.synthmet.2010.11.015

4. Arie A.A., Lee J.K. Synthesis of Boron-Doped C_{60} Film Using Plasma-Assisted Thermal Evaporation Technique and Its Electrochemical Characterizations. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 216-223. DOI: 10.1080/1536383x.2010.542592

5. Boroznin S.V. Carbon Nanostructures Containing Boron Impurity Atoms: Synthesis, Physicochemical Properties and Potential Applications. *Modern Electronic Materials*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 23-42. DOI: 10.3897/j.moem.8.1.84317

6. Cao B., Zhou X., Shi Z., Gu Z., Xiao H., Wang J. Synthesis of $C_{60-N}B_N$ and $C_{70-N}B_N$ (N = L, 2) by DC Arc Burning Method. *Fullerene Science and Technology*, 1998, vol. 6, no. 4, pp. 639-648. DOI: 10.1080/10641229809350225

7. Cao B., Zhou X., Shi Z., Jin Z., Gu Z., Xiao H., Wang J. Synthesis and Characterization of Boron-Doped Fullerenes. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 1997, vol. 13, no. 3, pp. 204-206. DOI: 10.3866/PKU.WHXB19970304

8. Churilov G.N. Plasma Synthesis of Fullerenes. *Instruments and Experimental Techniques*, 2000, vol. 43, pp. 1-10. DOI: 10.1007/BF02758988

9. Churilov G.N., Alikhanyan A.S., Nikitin M.I., Glushchenko G.A., Vnukova N.G., Bulina N.V., Emelina A.L. *Sintez i issledovanie borozameshhennogo fullerena i fullerena so skandiem* [Synthesis and Investigation of Boron-Doped Fullerene and Scandium-Containing Fullerene]. *Pisma v Zhurnal tehnicheskoj fiziki* [Technical Physics Letters], 2003, vol. 29, no. 4, pp. 81-85. DOI: 10.1134/1.1558758

10. Dunk P.W., Kaiser N.K., Mulet-Gas M., Rodríguez-Fortea A., Poblet J.M., Shinohara H., Hendrickson C.L., Marshall A.G., Kroto H.W. The Smallest Stable Fullerene, $M@C_{28}$ (M = Ti, Zr, U): Stabilization and Growth from Carbon Vapor. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, vol. 134, no. 22, pp. 9380-9389. DOI: 10.1021/ja302398h

11. Epifanov G.I. *Fizika tverdogo tela: ucheb. posobie* [Solid State Physics. Textbook]. Saint Petersburg, Lan Publ., 2022. 288 p.

12. Guo T., Jin C., Smalley R.E. Doping Bucky: Formation and Properties of Boron-Doped Buckminsterfullerene. *The Journal of Physical Chemistry*, 1991, vol. 95, no. 13, pp. 4948-4950. DOI: 10.1021/j100166a010

13. Koenig R.M., Tian H.R., Seeler T.L., Tepper K.R., Franklin H.M., Chen Z.C., Xie S.Y., Stevenson S. Fullertubes: Cylindrical Carbon with Half-Fullerene End-Caps and Tubular Graphene Belts, Their Chemical Enrichment, Crystallography of Pristine C_{90}–D_{5h}(1) and C_{100}–D_{5d}(1) Fullertubes, and Isolation of C_{108}, C_{120}, C_{132}, and C_{156} Cages of Unknown Structures. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, vol. 142, no. 36, pp. 15614-15623. DOI: 10.1021/jacs.0c08529

14. Krätschmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. Solid C_{60}: A New Form of Carbon. *Nature*, 1990, vol. 347, no. 6291, pp. 354-358. DOI: 10.1038/347354a0

15. Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E. C_{60}: Buckminsterfullerene. *Nature*, 1985, vol. 318, no. 6042, pp. 162-163. DOI: 10.1038/318162a0

16. Manawi Y.M., Ihsanullah, Samara A., Al-Ansari T., Atieh M.A. A Review of Carbon Nanomaterials' Synthesis via the Chemical Vapor Deposition (CVD) Method. *Materials*, 2018, vol. 11, no. 5, p. 822. DOI: 10.3390/ma11050822

17. Moreno-Vicente A., Alías-Rodríguez M., Dunk P.W., de Graaf C., Poblet J.M., Rodríguez-Fortea A. Highly Oxidized U (VI) Within the Smallest Fullerene: Gas-Phase Synthesis and Computational Study of Boron-Doped $U@C_{27}B$. *Inorganic Chemistry Frontiers*, 2023, vol. 10, no. 3, pp. 908-914. DOI: 10.1039/D2QI02160A

18. Muhr H.J., Nesper R., Schnyder B., Kötz R. The Boron Heterofullerenes $C_{59}B$ and $C_{69}B$: Generation, Extraction, Mass Spectrometric and XPS Characterization. *Chemical Physics Letters*, 1996, vol. 249, no. 5-6, pp. 399-405. DOI: 10.1016/0009-2614(95)01451-9

19. Mykhailiv O., Zubyk H., Plonska-Brzezinska M.E. Carbon Nano-Onions: Unique Carbon Nanostructures with Fascinating Properties and Their Potential Applications. *Inorganica Chimica Acta*, 2017, vol. 468, pp. 49-66. DOI: 10.1016/j.ica.2017.07.021

20. Nakamura T., Ishikawa K., Yamamoto K., Ohana T., Fujiwara S., Koga Y. Synthesis of Heterofullerenes by Laser Ablation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 1999, vol. 1, no. 10, pp. 2631-2633. DOI: 10.1039/A902495F

21. Parker D.H., Wurz P., Chatterjee K., Lykke K.R., Hunt J.E., Pellin M.J., Hemminger J.C., Gruen D.M., Stock L.M. High-Yield Synthesis, Separation, and Mass-Spectrometric Characterization of Fullerenes C_{60} to C_{266}. *Journal of the American Chemical Society*, 1991, vol. 113, no. 20, pp. 7499-7503. DOI: 10.1021/ja00020a008

22. Pérez-Ojeda M.E., Castro E., Kröckel C., Lucherelli M.A., Ludacka U., Kotakoski J., Werbach K., Peterlik H., Melle-Franco M., Chacyn-Torres J.C., Hauke F., Echegoyen L., Hirsch A., Abellán G. Carbon Nano-Onions: Potassium Intercalation and Reductive Covalent Functionalization. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, vol. 143, no. 45, pp. 18997-19007. DOI: 10.1021/jacs.1c07604

23. Prinzbach H., Weiler A., Landenberger P., Wahl F., Wörth J., Scott L.T., Gelmont M., Olevano D.,

von Issendorff B. Gas-Phase Production and Photoelectron Spectroscopy of the Smallest Fullerene, C_{20}. *Nature*, 2000, vol. 407, no. 6800, pp. 60-63. DOI: 10.1038/35024037

24. Zou Y., Chen G., Yan H. Formation and Infrared Studies of Boron-Doped C_{60}. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2000, vol. 61, no. 7, pp. 1051-1054. DOI: 10.1016/s0022-3697(99)00362-5

25. Zou Y.J., Li Y.L., Zhang X.W., Wang B., Yan H. Structure and Optical Properties of Boron-Doped C_{60} Thin Films. *Materials Science and Engineering: B*, 2001, vol. 84, no. 3, pp. 163-166. DOI: 10.1016/S0921-5107(00)00793-5

COMPARATIVE STUDY OF THE SYNTHESIS METHODS OF THE BORON-SUBSTITUTED FULLERENES [1]

Anton R. El Zanin

Student, Department of the Forensic Examination and Physical Materials Science,
Volgograd State University
nmtb-201_341523@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Sergey V. Boroznin

Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor,
Head of the Department of the Forensic Examination and Physical Materials Science,
Volgograd State University
boroznin@volsu.ru
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

Abstract. A review of the methods for the producing of the boron-substituted fullerenes was performed in this paper. Doping of carbon nanostructures with boron allows controlling their geometrical, electron-conducting, and optical properties. It is known that boron is an acceptor impurity with respect to group IVA semiconductors (C, Si, Ge). Various carbon materials with boron impurities are of great interest to researchers today. Boron-substituted fullerenes are also not an exception in this respect – to date there is a large body of research devoted to this topic, carried out with the involvement of both theoretical and experimental methods. For this purposes laser evaporation method, arc-discharge method, and chemical vapor deposition method are used. The schemes of the boron-substituted fullerene setups, the equipment, and the materials are shown; the main operations of the synthesis are described for each method. Ways for extracting the target product from fullerene-containing soot and the reagents required for this are described. Different methods for the producing of the boron-substituted fullerenes have been compared according to a number of criteria, including product yield, method cost and special equipment requirements. The conclusion highlights the advantages and disadvantages of each method, as well as their applicability for research and industrial purposes.

Key words: boron-substituted fullerenes, synthesis methods, laser evaporation, arc-discharge method, chemical vapor deposition.