

Иванов

Отзыв

на автореферат диссертации Шавелкиной Марины Борисовны на тему: «Синтез углеродных наноструктур в плазменных струях плазмотрона постоянного тока», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертационная работа Шавелкиной Марины Борисовны посвящена актуальной проблеме разработки метода плазменного синтеза чистых углеродных наноструктур для их получения в промышленных количествах и дальнейшего применения в различных материалах и технологиях. Работа нацелена на решение как научных, так и практических проблем, исследует и подробно описывает влияние условий формирования углеродных наноструктур на их морфологию, структуру, тип химической связи и потребительские свойства, включая свойства высокотемпературной керамики, газодиффузионного слоя топливного элемента, суперконденсатора и компонентов гибкой электроники, созданных на основе или с добавками синтезированных наноструктур.

Решение поставленных в работе задач позволяет существенно расширить фундаментальные знания о процессах в плазменных струях при синтезе наноуглеродных систем, содержащих гетероатомы, формирует научные основы для выбора направления дальнейшего их использования, предоставляет конкретные параметры синтеза и области применения данных материалов для промышленного освоения.

Представленная к защите диссертационная работа обладает научной новизной и практической значимостью.

Научная значимость работы. Разработана новая экспериментальная методика селективного синтеза углеродных нанотрубок, многослойного графена, углеродных нановолокон и онионов, основанная на синтезе в объеме. Определен состав, температура и концентрация электронов плазменных струй гелия, аргона и азота с добавками углеводородов и этанола для синтеза углеродных наноструктур. Предложена модель реактора для определения профиля температур и скоростей вдоль оси и по радиусу плазменного потока. Установлен состав газов, отработанных плазмотроном в зависимости от типа прекурсора углерода. Показано, что при

синтезе углеродных наноструктур в газовой фазе практически отсутствуют поциклические ароматические углеводороды, основные предшественники сажи. Предложены кинетические модели процессов конверсии смесей пропан/бутан/гелий и метан/азот. Установлена зависимость структурно-морфологических свойств синтезированных материалов от агрегатного состояния прекурсора углерода. Установлено, что в присутствии комбинированного катализатора при пиролизе сажи в плазменных струях гелия, генерируемых плазмотроном постоянного тока, формируются прямые углеродные нанотрубки с открытыми концами. Установлено влияние отношения C:H в газообразном прекурсор углерода на условия для интеркаляции многослойного графена водородом. Обнаружено, что при одностадийном синтезе легированного графена атомами азота (N – графена) преобладает пиридиновая конфигурация химической связи атомов азота с углеродом. Показано, что атомы водорода, азота и кислорода в структуре синтезированных графеновых материалов и углеродных нанотрубок влияют на их термостабильность. Показано, что при пиролизе углеводородов в плазме гелия и аргона характерно образование углеродных нановолокон в виде жгутов.

Практическая значимость работы. Найденный диапазон осевых температур плазмы (12--17 кК), в котором концентрация электронов остается неизменной, является «экономным» режимом нагрева и может быть использован для оптимизации параметров плазмы за счет поддержания контролируемой интенсивности полосы C2 на максимальном уровне. Показано, что при синтезе графена и углеродных нанотрубок в плазменных струях гелия, аргона и азота, генерируемых плазмотроном постоянного тока, при добавлении углеводородов удельная мощность дуги составляет  $10^4$  W/cm, а концентрация электронов превышает  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Определено давление, отношение расхода плазмообразующего газа и расхода прекурсора углерода для высокого выхода многостенных углеродных нанотрубок, мультиграфена, углеродных нановолокон и онионов в плазмохимическом реакторе. Определен профиль температур и скоростей, состав газовой фазы в реакторе в зависимости от геометрии области закалки парогазового потока. Полученные автором результаты могут использоваться для проектирования нового плазмохимического оборудования. Найден оптимальный состав катализатора на основе Ni, Co и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, при котором достигается максимальное содержание

многостенных углеродных нанотрубок в депозите. Найдены условия для предельной интеркаляции водородом многослойного графена, легирования азотом N-графена, функционализации многослойного графена кислородом и насыщения медью нанокompозита медь/графен в один этап. Определена структура пор и удельная поверхность многослойного графена, углеродных нанотрубок и онионов демонстрирующие потенциал использования синтезированных материалов

Достоверность полученных диссертантом данных, выводов и представленных моделей определяется значительным объемом экспериментальных данных, их системным анализом, применением современного высокоточного оборудования, воспроизводимостью результатов.

В качестве замечаний к автореферату следует отметить, что они относятся в основном к сделанным опечаткам и терминологическим неточностям в тексте.

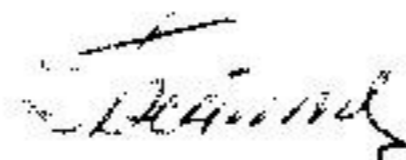
1. На стр. 3 диаметр нанотрубки обозначен как «...порядка нескольких атомов...». Автору следовало бы придерживаться метрической системы, даже с учетом сравнения нанотрубки с иглой атомного силового микроскопа.
2. На стр.4 отмечено, что синтез с применением плазмы часто дает побочные продукты в виде сажи, аморфного углерода и графитизированных частиц. Хотелось бы уточнить, что подразумевается здесь под графитизированными частицами, ведь сажа, нанотрубки и нановолокна не графитизируются и остаются аморфными даже после обработки до 2800 -3000 °С. Здесь же, на стр.4 в задачах исследования отмечено, что автором ставилась задача получения «широкого ряда кристаллических углеродных систем». Из кристаллов, содержащих только углерод, известны алмаз и графит. Графен, углеродные нанотрубки, сажа, фуллерены, онионы к кристаллам не относятся.
3. На стр.5 среди решаемых задач обозначено «создание модели химической кинетики процессов разложения». Следует писать «Создание кинетической модели химического (или термохимического) процесса».
4. На стр.21 автореферата сорбционная емкость образцов графена при их удельной поверхности 250-500 м<sup>2</sup>/г обозначена как 1400 м<sup>3</sup>/г, не понятно по какому компоненту. Это, вероятно, вкралась ошибка в единицы измерения. Скорее, должно быть 1400-1700 г/г, если это по азоту, или примерно 1400 дм<sup>3</sup>/г.

Представленная работа по актуальности, научной новизне, и значимости результатов исследований, степени их научной апробации и опубликования в научных журналах соответствует критериям, установленным п.п. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021)), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.9 - физика плазмы, а ее автор Шавелкина М.Б. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Согласна на включение персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель АО "НИИГрафит"

доктор техн. наук,



Бейлина Наталия Юрьевна

111524. г. Москва, Электродная ул. д.2 стр.1; АО "НИИГрафит"

тел.+7(495)278-00-08\*23-12, моб. +7(916)609-13-54

beilinan@mail.ru;

АО "Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита "НИИГрафит"

подпись Н.Ю.Бейлиной заверяю

ДАТА 03.08.2024

Директор АО «НИИГрафит»

А.И. Голиней