

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИВТРАН

125412, Москва
ул. Ижорская, 13, стр. 2
Телефон: (495) 485-83-45
Факс: (495) 485-99-22

«УТВЕРЖДАЮ»
Зам. директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Объединенного Института высоких температур
Российской академии наук (ОИВТ РАН)
К.Ф.М.Н. Гавриков А.В.



«16» ноября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Ирхи Владимира Александровича
«Электронно-стимулированная кристаллизация
аморфных углеродных наноструктур»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы

Получение и исследование свойств наноструктурированных материалов является в настоящее время одним из наиболее развивающихся направлений физики конденсированного состояния. В рамках данного направления особую актуальность приобретают фундаментальные и прикладные задачи, направленные на разработку новых типов наноматериалов и методов их получения. Весьма интересным подходом, позволяющим управляемо выращивать одиночные наноструктуры заданного состава и формы является метод электронно-стимулированной кристаллизации. В связи с этим

диссертационная работа Ирхи В.А., посвящённая исследованию кинетики роста наноструктур из аморфного углерода методом электронно-стимулированной кристаллизации, а также определению их физических свойств и практическому применению, несомненно является актуальной научной задачей с высоким прикладным потенциалом.

Общая характеристики работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения и списка литературы. Работа изложена на 140 страницах печатного текста, включая 4 таблицы и 55 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 103 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, представлены положения, выносимые на защиту. Кратко отмечены новизна и практическая значимость результатов, полученных в ходе исследования.

В первой главе представлены особенности метода электронно-стимулированной кристаллизации и подходы к моделированию данного процесса. Определены основные материалы, используемые для создания наноструктур методом электронно-стимулированной кристаллизации. Выявлены пробелы в исследованиях процесса формирования наноструктур из аморфного углерода, указанным методом. Показана перспективность практической реализации метода электронно-стимулированной кристаллизации для получения функциональных наноструктур из аморфного углерода с заданными физическими свойствами.

Вторая глава посвящена моделированию процесса электронно-стимулированной кристаллизации. Определены основные факторы влияющие на процесс роста аморфного углерода под действием пучка высокоэнергетичных электронов. Разработаны аналитическая и имитационная модели электронно-стимулированной кристаллизации. Представлена двухмерная модель роста наноструктур, учитывающая вклад первичных, вторичных и отраженных электронов.

В третьей главе определены требования, предъявляемые к технологическому оборудованию для получения наноструктур из аморфного углерода методом электронно-стимулированной кристаллизации. Описаны технические и фундаментальные ограничения, влияющие на техническую реализацию метода электронно-стимулированной кристаллизации. Определены основные аналитические методы для всестороннего исследования наноструктур из аморфного углерода.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и практическому применению метода электронно-стимулированной кристаллизации аморфных углеродных наноструктур. Определены основные закономерности роста наноструктур из аморфного

углерода для двух типов прекурсоров: нафтенового и изопарафинового. Установлены линейные и объемные скорости роста аморфных углеродных наноструктур для обоих прекурсоров в зависимости от тока и ускоряющего напряжения пучка первичных электронов. Методами комбинационного рассеяния и просвечивающей микроскопии определены параметры аморфности, получаемых углеродных наноструктур и влияние этих параметров на удельное сопротивление наноструктур. Представлены экспериментальные методики получения суперзондов и позиционных меток для сканирующей атомно-силовой микроскопии.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы. Список цитируемой литературы содержит источники, удовлетворяющие всем вопросам диссертационной работы.

Результаты диссертации подробно изложены в научных публикациях соискателя, в том числе в изданиях, входящих в перечень ВАК и Scopus, а также в патенте РФ. Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

Научная новизна работы заключается в получении ряда новых теоретических сведений о процессе электронно-стимулированной кристаллизации наноструктур из аморфного углерода, разработке аналитической и имитационной математических моделей роста аморфного углерода под действием пучка высокоэнергетичных электронов, основанных на расчетах траекторий движения первичных электронов и учитывающих генерацию вторичных, отраженных электронов и особенностей диссоциации углеводородных молекул. В числе основных результатов можно выделить следующие:

1. Выполнен расчет гистограмм радиального и латерального распределений отраженных и вторичных электронов под действием первичного электронного пучка с энергией меньше 30 кэВ.

2. Предложены аналитические выражения для оценки сечений диссоциации углеводородных молекул C_xH_y в широком энергетическом диапазоне.

3. Получены экспериментальные результаты, характеризующие кинетику процесса электронно-стимулированной кристаллизации в зависимости от энергии и тока пучка для двух типов углеводородных прекурсоров.

4. Исследовано влияние энергии первичных электронов на процентное содержание водорода в выращиваемых наноструктурах и степень их аморфности для двух типов углеводородных прекурсоров.

5. Изучено влияние энергии первичных электронов на электрическое сопротивление наноструктур из аморфного углерода, полученных методом электронно-стимулированной кристаллизации.

Научная значимость работы диссертационной работы

1. Продемонстрирована возможность метода электронно-стимулированной кристаллизации для получения индивидуальных наноструктур из аморфного углерода с заданными физическими параметрами.

2. Проведена оценка вклада первичных, вторичных и отраженных электронов вносимого в рост наноструктур методом электронно-стимулированной кристаллизации.

3. Установлены линейные и объемные скорости роста углеродных наноструктур в зависимости от структуры углеводородной молекулы, на примере нафтеновых и изопарафиновых углеводородов.

4. Развита теория и практика электронно-стимулированной кристаллизации наноструктур из аморфного углерода.

Все полученные результаты имеют большое значение для науки и практики создания новых функциональных материалов на основе аморфного углерода.

Практическая ценность полученных результатов заключается в разработке лабораторного способа выращивания углеродных наноструктур диаметром менее 10 нм методом электронно-стимулированной кристаллизации из углеродсодержащих прекурсоров, а также в создании методики нанесения позиционных меток на заданном участке поверхности для атомно-силовой и туннельной микроскопии. Разработанные методики позволяют управляемо изменять форму, линейные размеры и высоту меток в широком диапазоне от единиц до сотен нанометров. Также данные методики позволяют изготавливать прецизионные датчики для атомно-силовой микроскопии и формировать проводящие углеродные наноконтакты с низким удельным сопротивлением.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к использованию в МИСиС (Москва), ЗАО НТ-МДТ (Зеленоград), ОИВТ РАН (Москва), ИМХ РАН (Нижний Новгород), ИЦЧ РАН (Черноголовка), ИФП СО РАН (Новосибирск), ЮФУ (Ростов-на-Дону), ЮНЦ РАН (Ростов-на-Дону), ЮРГПУ(НПИ) (Новочеркасск), ВГУ (Воронеж), ЧГУ (Чебоксары), КФУ (Казань), а также в других научных организациях и университетах.

Общие замечания и недостатки

1. В работе разработана физико-математическая модель электронно-стимулированной кристаллизации, в которой учтен вклад различных факторов, влияющих на рост наноструктур из аморфного углерода. В модели рассматриваются влияние первичных, вторичных и отраженных электронов на процесс кристаллизации, однако отсутствует

рассмотрение влияния оже-электронов и характеристического рентгеновского излучения, которые также присутствуют в процессе взаимодействия высокоэнергетичных электронов с веществом. Также в диссертации не анализируется роль адсорбированных атомов водорода на поверхности синтезируемых аморфных углеродных наноструктур.

2. Представленные в диссертации экспериментальные исследования процесса электронно-стимулированной кристаллизации выполнены для двух видов углеродсодержащих прекурсоров. Зависимости роста аморфных углеродных наноструктур исследовались для различных токов и ускоряющих напряжений пучка первичных электронов, однако все эксперименты выполнялись при фиксированных барических условиях. Для представления полной картины процесса электронно-стимулированной кристаллизации, важно знать зависимости роста наноструктур от парциального давления каждого из прекурсоров.

3. В работе показано, что объемная скорость кристаллизации для изопарафинового прекурсора при энергии пучка $E = 5$ кэВ примерно вдвое ниже, чем для нафтенового, на основании чего сделан вывод, что изопарафины преимущественно разлагаются на простые радикалы C1 и C2 с общей вероятностью 86%, а для нафтенов доля этих радикалов снижается до 61% и повышается выход радикалов C3 и C4. Этот вывод, опирающийся только на одну серию измерений при фиксированной энергии пучка и использование эмпирических формул для сечений диссоциации, полученных по литературным данным для гораздо более легких углеводородов, представляется недостаточно обоснованным. Вполне вероятно, что увеличение скорости кристаллизации может быть объяснено простым увеличением сечения диссоциации с ростом средней массы молекул прекурсора с C₁₁ до C₁₇.

4. Показанные в главе 4 примеры практического применения результатов диссертации сводятся к использованию метода электронно-стимулированной кристаллизации для получения нанометок и прецизионных зондов для атомно-силовой микроскопии. В данном контексте было бы интересно знать физико-механические параметры, получаемых наноразмерных острий, в частности их прочностные характеристики.

5. Следует отметить значительное количество досадных опечаток и неточностей в тексте диссертации и автореферата, а также при оформлении графиков и рисунков.

Указанные замечания не носят принципиальный характер, не влияют на общую положительную оценку и не снижают научной и прикладной значимости представленной диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа «Электронно-стимулированная кристаллизация аморфных углеродных наноструктур» является законченной научно-квалификационной работой на

актуальную тему, а полученные в ходе ее выполнения результаты имеют важное значение для развития физики конденсированного состояния в области управляемого получения индивидуальных аморфных углеродных наноструктур с заданными характеристиками. Представленная диссертация соответствует п. 9 положения «О порядке присуждения ученых степеней» №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Ирха Владимир Александрович, заслуживает присуждение ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником, ученым секретарем ОИВТ РАН Амировым Равилем Хабибуловичем (Место работы: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук. Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, тел. +7(495) 485 90 09, e-mail: amirovravil@yandex.ru), доктором физико-математических наук, профессором, заведующими лабораторией неравновесных процессов Ереминым Александром Викторовичем (Место работы: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук. Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, тел. +7(495) 483-23-14, e-mail: eremin@ihed.ras.ru).

Результаты диссертационной работы Ирхи В.А. обсуждены и одобрены на совместном семинаре лаборатории плазмы НИЦ-2 ОИВТ РАН и лаборатории неравновесных процессов НИЦ-1 ОИВТ РАН «16» ноября 2016 г., протокол № 4.

Ученый секретарь ОИВТ РАН

доктор физ.-мат. наук, с.н.с.



Амиров Р.Х.

Заведующий лабораторией

доктор физ.-мат. наук, профессор

Еремин А.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2.

(495)485-83-45, amirovravil@yandex.ru