

ОТЗЫВ

официального оппонента 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 диссертационной работы

Углеродные наноструктуры такие как углеродные нанотрубки, графен и аморфный углерод являются перспективными объектами современного материаловедения и твердотельной электроники. Значительное число аллотропных форм углерода, разнообразие их свойств и областей применения делают так называемую «карбоновую физику конденсированного состояния» отдельной и широко востребованной ветвью современной науки.

Получение наноструктур из аморфного углерода осуществляется методами вакуумного термического, ионно-плазменного, газофазного и электронно-стимулированного осаждения. Последний из указанных методов относится к сравнительно малоизученным технологическим *in-situ* методам управляемого роста углеродных наноструктур. Кроме того, можно констатировать, что остаются также мало изученными закономерности формирования таких наноструктур под действием электронного пучка.

В этой связи представленная диссертационная работа Ирхи В.А., направленная на изучении физических закономерностей электронно-стимулированного осаждения аморфных углеродных наноструктур из органических прекурсоров является, несомненно, актуальной и имеет важное практическое значение.

Научная новизна результатов, положений и выводов

К основным новым научным результатам диссертации Ирхи В.А. следует отнести:

1. Получены данные о радиальном и латеральном распределении отраженных и вторичных электронов под действием первичного электронного пучка с энергией меньше 30 кэВ и представлены аналитические выражения для оценки сечений диссоциации углеводородных молекул в широком энергетическом диапазоне.

2. Обнаружено, что повышение энергии электронного пучка при фиксированном токе пучка приводит к уменьшению установившегося диаметра наноструктур для двух типов, изучаемых прекурсоров, что обусловлено снижением интегрального коэффициента выхода и сужением пространственной области формирования вторичных электронов при большей энергии. Показано, что линейная скорость в отличие от диаметра напротив растет с повышением энергии, достигая максимальных значений при 30 кэВ.

3. Установлено, что при больших токах электронного пучка скорость роста углеродных наноструктур лимитируется не потоком электронов, вызывающих диссоциацию молекул прекурсора, а потоком самого прекурсора. Показано, что затяжной характер достижения максимальной скорости при высоких энергиях можно объяснить тем, что электроны высоких энергий глубже проникают в ростовой материал, что приводит к меньшему коэффициенту выхода вторичных электронов.

4. Продemonстрировано, что содержание водорода в выращенных аморфных углеродных наноструктурах зависит от энергии первичных электронов и состава прекурсора. При низких энергиях наблюдается максимальное содержание водорода. Показано, что при энергиях выше 10 кэВ доля водорода снижается и в дальнейшем остается неизменной при повышении энергии.

Практическая значимость полученных результатов

К важным практическим результатам диссертации Ирхи В.А. можно отнести следующее:

1. Разработан комплекс технологических операций по получению углеродных наноструктур диаметром менее 10 нм, учитывающий особенности взаимодействия электронного пучка с разветвленными углеводородными молекулами.

2. Предложена методика получения и использования позиционных меток для задач атомно-силовой, электронной и туннельной микроскопии. Показано, что форму, линейные размеры и высоту меток можно управляемо изменять в широком диапазоне от нескольких нанометров до сотен нанометров.

3. Создан способ изготовления прецизионных зондовых датчиков для контактных и полу-контактных методик атомно-силовой микроскопии.

4. Продemonстрирована принципиальная возможность получения проводящих углеродных наноконтактов с низким удельным электрическим сопротивлением.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов диссертационного исследования и обоснованность сформулированных обобщений и выводов не вызывает сомнения. Достоверность обеспечивается большим объемом экспериментов, корректностью применения широкого комплекса современных высокоэффективных методов исследования, сопоставлением полученных данных с известными экспериментальными результатами родственных исследований и глубоким анализом экспериментальных данных, основанных на современных достижениях физики конденсированного состояния.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоял в разработке концептуальных подходов, выполнении расчетов, непосредственном проведении экспериментальных исследований, анализе и обобщении полученных результатов. Результаты и положения, выносимые на защиту и составляющие научную новизну диссертационной работы получены автором лично.

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 55 рисунков, 4 таблицы и список цитированной литературы из 103 источников.

Диссертация отражает значительный объем проделанной теоретической и экспериментальной работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне.

Поставленные в работе задачи исследования кинетики электронно-стимулированного осаждения и свойств полученных углеродных материалов были решены с использованием комплексного подхода, включающего в себя применение

широкого спектра современных методов исследования, адаптацию существующих, а также привлечение методов моделирования.

Диссертация Ирхи В.А. является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой, в которой решена научная задача исследования закономерностей процесса электронно-стимулированного роста аморфных углеродных наноструктур из углеводородных прекурсоров, имеющая существенное значение для развития физики конденсированного состояния.

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении НИР и НИОКР в рамках грантов РФФИ, Минобрнауки РФ, фонда содействия развития малых форм предпринимательства в научно-технической сфере.

Публикация основных результатов

Полученные в диссертационной работе результаты отражены в 24 опубликованных работах, в том числе 7 статьях, опубликованных в реферированных журналах из перечня ВАК РФ, 1 патент РФ.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ВАК РФ

Автореферат содержит краткое изложение всех основных результатов диссертационной работы и в полной мере соответствует содержанию диссертации. Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с действующими ГОСТами и соответствуют требованиям Высшей аттестационной комиссии РФ.

Замечания по диссертационной работе

При общей положительной оценке диссертационной работы нельзя не сделать ряд замечаний:

1. Следует отметить не удачное использование термина «кристаллизация» для описания процесса формирования структур на основе аморфного углерода. Не понятно, почему автор не использовал более подходящий для описания данного процесса термин «осаждение».

2. В разработанной модели роста не учитывается эффект нагрева под воздействием электронного луча, который потенциально может привести к существенному локальному повышению температуры. К сожалению, в работе не приведены количественные оценки локального изменения температуры за счет нагрева и влияние данного фактора не рассматривалось.

3. Анализ возможности использования углеродных наноструктур для создания проводящих наноконтактов проведен в упрощенном виде. В работе приведены только значения удельного сопротивления контактов, однако методика измерения раскрыта не полностью, в частности, не представлены вольтамперные характеристики. Большой интерес также представляет анализ электронных свойств границ раздела между углеродными наноконтактами и полупроводниками.

4. Помимо выявленных замечаний по существу, работа также не лишена недостатков оформления. Например, автор использует одинаковые буквы для обозначения различных физических величин. Так в формуле (1.2) на стр. 20 символ P обозначает давление газа, а в формуле (1.12) на стр. 23 поверхностную плотность молекул. Отсутствуют условные обозначения на графиках, представленных на рисунках 4.3 (стр. 103), 4.4 (стр. 104), 4.5-4.6 (стр. 105), 4.7 (стр. 106), 4.8 (стр. 107), 4.10 (стр. 110) и 4.11 (стр. 111). На рисунках 4.16,а-г (стр. 117) отсутствуют маркеры размеров. Текст диссертации и автореферата содержит также ряд досадных опечаток.

Однако отмеченные недостатки и сделанные замечания не ставят под сомнение полученные результаты, не снижают научной новизны и практической ценности диссертационной работы и в целом не влияют на общее положительное впечатление от диссертации.

Заключение

Диссертационная работа «Электронно-стимулированная кристаллизация аморфных углеродных наноструктур» по форме, содержанию, актуальности и полноте решенных задач, совокупности новых и практически значимых научных результатов отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Ирха Владимир Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории возобновляемых
источников энергии
центра нанотехнологий
СПбАУ РАН

Гудовских Александр Сергеевич

Подпись в.н.с. Гудовских А.С. заверяю:

Главный специалист по кадрам *Ирина Александровна*



Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук»,
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, к. 3А,
тел. (812) 448-69-80, доб. 5070
e-mail: godovskikh@spbau.ru