

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию В.А. Ирхи «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

Диссертация Ирхи В.А. посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию углеродных наноматериалов, проявляющих достаточно высокую механическую прочность и имеющих весьма низкое удельное сопротивление. В последнее десятилетие наблюдается значительный рост интереса к аморфным конденсированным средам, содержащим водород, свойства которых значительно отличаются от алмаза и графита. Такие материалы, в основном, получают газофазной эпитаксией. Диссертант предложил новый альтернативный метод электронно-стимулированной кристаллизации углеродных наноматериалов. В этом контексте тема рецензируемой диссертации представляется безусловно актуальной и имеющей важную научную значимость и практическую ценность.

### ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выносимых на защиту научных положений диссертационной работы обусловлена тем, что они получены с использованием апробированных экспериментальных методов исследования и применением современного и адекватного математического аппарата. Автором диссертации применены методы электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, атомно-силовой микроскопии, электрических методов для изучения геометрических размеров, электрического сопротивления и состава выращенных наноструктур.

## НОВИЗНА НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе разработан новый экспериментальный ростовой метод и получена совокупность новых экспериментальных результатов по исследованию закономерностей и свойств углеродных наноструктур. К основным новым научным результатам диссертации можно отнести следующие:

- Разработана модель электронно-стимулированной кристаллизации, позволяющая теоретически исследовать закономерности ростового процесса и их зависимость от основных технологических условий.
- Получены новые экспериментальные результаты зависимости скорости электронно-стимулированной кристаллизации аморфных углеродных наноструктур от состава прекурсора, энергии и тока электронного пучка.
- Представленные данные о влиянии энергии электронов на углеводородный состав выращенных авторским методом наноструктур.
- Получены сведения о влиянии энергии первичного пучка на электрическую проводимость углеродных наноструктур.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ

- Установлены закономерности формирования углеродных наноструктур при электронно-стимулированной кристаллизации, из разветвленных углеводородных прекурсоров изопарафиновой и нафтеновой групп.
- Разработана лабораторная методика нанесения позиционных меток для задач атомно-силовой микроскопии.
- Предложен способ изготовления прецизионных зондовых датчиков для атомно-силовой микроскопии

- Сформулирован научно-обоснованный подход к in-situ изготовлению проводящих углеродных наноконтактов к полупроводниковым структурам.

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 140 страниц, включая 55 рисунков и 4 таблиц. Список литературы содержит 103 источника.

Результаты исследований представлены в 7 статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, и 1 патенте. Опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации. Результаты исследований были использованы при выполнении научно-исследовательских работ как фундаментального так и прикладного характера.

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

Автореферат содержит краткое изложение всех основных положений диссертационной работы.

## ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. В главе 2 на стр. 49 приводятся выражения (2.20) - (2.22), в которых используется потенциал ионизации Бергера-Зельцера и вводится условие перехода от модели Бете-Блоха к модели Рао-Сахиба-Витри. Хотелось бы услышать критерий и обоснование причины перехода от одного модельного представления к другому. Это же замечание относится к уравнениям (1) - (3) на стр. 8 автореферата.

2. В главе 3 на стр. 95-97 при описании использованного автором ростового оборудования необходимо было бы привести описание методики подачи углеводородного прекурсора в зону протекания реакции электронно-стимулированной кристаллизации. Кроме того, весьма уместно было бы привести данные о величине потоков ростовых веществ.

3. В главе 4 на стр. 115 приведен рисунок 4.14 – калибровочный график зависимости концентрации водорода от длины волны  $G$ -пика рамановских спектров, заимствованный из известной статьи Робертсона (ссылка на работу Робертсона в диссертации имеется). Однако, хотелось бы обратить внимание соискателя на давние научные дискуссии группы Робертсона (*Robertson J.*) с группой Энзингера (*Ensinger W.*) о величине погрешностей такого метода измерений. Представляется, что разброс данных рисунка 4.14 в реальности может быть больше, что в конечном итоге несколько увеличит погрешность авторских результатов на рисунке 4.15 (стр. 116).

4. В той же главе 4 на стр.122-123 приведена методика получения проводящих контактов методом электронно-стимулированной кристаллизации. Считаю, что описанию методики измерений проводимости и, в особенности, учета изменения диаметра наноконтакта при варьировании энергии можно было бы уделить больше внимания.

Отмеченные замечания носят частный и по большей части дискуссионный характер, не затрагивают основных научных положений работы и не влияют на ее высокую оценку в целом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Ирхи В.А. изложена грамотно и доказательно, ее научное содержание и стиль изложения соответствует современному международному уровню исследований в области физики конденсированного состояния. Диссертацию можно охарактеризовать как завершённую научно-квалификационную работу, в которой изложено

решение научной проблемы, имеющей существенное значение для развития физики и технологии углеродных наноструктур.

Считаю, что диссертационная работа «Электронно-стимулированная кристаллизация аморфных углеродных наноструктур» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ирха Владимир Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент –  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Лауреат Государственной  
премии РФ в области науки и техники,  
Почетный работник высшего  
профессионального образования,  
Вице-президент АО «НПП «Радий»



БАВИЖЕВ Мухамед Данильевич

14 ноября 2016 г.

Акционерное общество  
«Научно-производственное  
предприятие» «Радий»,  
125315, г. Москва, ул. Часовая, д.28,  
тел. +7 495 151-49-67,  
e-mail: bavizhev@yahoo.com,  
<http://www.npp-radiy.ru>