

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Евсеева Александра Павловича на тему: **«Влияние облучения заряженными частицами на характеристики функциональных углеродных наноматериалов»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника

Развитие микро- и наноэлектроники связано с поиском новых путей, развитием технологий для создания новых материалов, структур и систем с новыми качественными характеристиками. **Тема диссертации** связана с решением задачи по установлению закономерностей образования и эволюции структуры перспективного наноматериала – многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) со специально сформированными в них радиационно-индуцированными дефектами для управления их физическими свойствами. Ионное облучение углеродных наноматериалов активно исследуется экспериментально и с помощью компьютерного моделирования для установления фундаментальных основ взаимодействия ионов с наноразмерными структурами и поиска новых областей применения модифицированных ионными пучками материалов в качестве наполнителей полимерных композитных материалов, антибактериальных препаратов, чувствительных элементов для газовых сенсоров. В связи со сказанным **темой диссертации**, безусловно, следует считать **актуальной** и с научной, и с практической точки зрения.

**Научная новизна** результатов работы состоит в том, что:

– экспериментально определено изменение доли связей с  $sp^2$ - и  $sp^3$ -гибридизацией после ионного облучения лабораторных МУНТ (синтезированных в НИИЯФ МГУ методом осаждения из газовой фазы), результаты сопоставлены с расчетом, выполненным методом молекулярной динамики. Проведено исследование влияния флюенса облучения ионами гелия на накопление дефектов в нанотрубках различного диаметра;

– изучено влияние флюенса облучения ионами гелия на изменение краевого угла смачивания дистиллированной водой поверхности спрессованной из МУНТ таблетки – от гидрофильного до супергидрофобного для таблеток из нанотрубок различного диаметра. Впервые обнаружено, что облучение ионами гелия увеличивает сорбционную способность МУНТ при удалении  $Ni(II)$  из водных растворов. Впервые показано, что после облучения ионами аргона МУНТ их антибактериальная активность увеличивается;

– показано, что коэффициент вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) полимерного композита зависит от типа внедряемых углеродных наполнителей, причем полимерные композиты с вертикально ориентированными нанотрубками обладают значительно более низким коэффициентом ВЭЭ при энергиях падающих на композит электронов выше 1 кэВ.

**Значимость для науки и практики** полученных результатов работы также несомненна и состоит в том, что:

– проведено экспериментальное исследование радиационно-индуцированного дефектообразования в МУНТ, проведено сопоставление с данными, рассчитанными методом молекулярной динамики. Полученные результаты важны для разработки и развития моделей взаимодействия заряженных частиц с наноструктурами и механизмов радиационно-индуцированного дефектообразования в углеродных наноматериалах;

– показано, что ионное облучение позволяет управлять смачиваемостью поверхности спрессованной таблетки из МУНТ: в зависимости от флюенса можно получать как супергидрофобные, так и гидрофильные поверхности. Данный способ может использоваться, например, для создания градиента смачиваемости – это позволит управлять перемещением жидкости по поверхности, что востребовано в устройствах микрофлюидики и сенсорах, перспективных устройствах диагностики типа «лаборатория-на-чипе»;

– увеличение эффективности фильтрации тяжелых металлов с помощью облученных МУНТ позволяет использовать их в качестве компактных и легких фильтров для воды. Эффект увеличения ингибирования роста колоний *E.coli* для МУНТ после ионного облучения востребован для создания антибактериальных препаратов для биомедицинских приложений;

– обнаружено, что полимерные композиты с ориентированными МУНТ обладают низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии. Явление ВЭЭ зачастую является нежелательным для ряда приложений. Например, в ускорительной технике, где ВЭЭ приводит к образованию электронных облаков, или в космической аппаратуре, где происходит возникновение резонансного радиочастотного разряда в вакууме, поддерживаемого вторичной электронной эмиссией со стенок высокочастотных приборов. Таким образом, полученные полимерные покрытия с низкой ВЭЭ могут быть востребованы в указанных областях, а также могут применяться в электронных спектрометрах, коллекторах

вторичных электронов после микроканальных пластинок и прочих регистрирующих ионный или электронный токи устройства;

**Основные результаты работы** опубликованы в рецензируемых журналах, были апробированы на профильных российских и международных научно-технических конференциях высокого уровня, из 11 печатных работ 9 статей в рецензируемых журналах, индексируемых RSCI/Web of Science/Scopus.

**Автореферат** написан понятным языком, изложенный материал в полной мере отражает, каким образом достигнута поставленная цель работы. Основные результаты работы соответствуют формуле и областям исследований специальности 1.3.5. Физическая электроника.

**В качестве замечания** отмечу следующее.

Из автореферата не ясно, на сколько стабильными являются достигнутые физические характеристики изученных в работе модифицированных ионными пучками многостенных углеродных нанотрубок и композитных материалов.

Однако указанное замечание не влияет на научную новизну, не снижает практическую значимость результатов работы и не затрагивает научных положений, выносимых на защиту.

Диссертация «Влияние облучения заряженными частицами на характеристики функциональных углеродных наноматериалов», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника, соответствует требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», утвержденного приказом ректора МГУ имени М.В. Ломоносова №33 от 18.01.2019 г. с изменениями, внесенными приказом ректора МГУ имени М.В. Ломоносова № 542 от 08.05.2019 г., а ее автор – Евсеев Александр Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. Физическая электроника.

Я, Литвинов Владимир Георгиевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Евсеевым Александром Павловичем и их дальнейшую обработку.

Литвинов Владимир Георгиевич,  
доктор физико-математических наук (научная специальность  
01.04.10 – Физика полупроводников), доцент,  
заведующий кафедрой «Микро- и наноэлектроника»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический  
университет им. В.Ф. Уткина»

Дата: 07 сентября 2023 года

Литвинов Владимир Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический  
университет им. В.Ф. Уткина»

Почтовый адрес: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

Раб. телефон: +7(4912)720366

электронная почта: litvinov.v.g@rsreu.ru, vglit@yandex.ru

Подпись руки Литвинова Владимира Георгиевича удостоверяю

Ученый секретарь ученого совета РГРТУ,  
канд. физ.-мат. наук

Бухенский Кирилл Валентинович