

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Городецкого Дмитрия Владимировича «МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАССИВЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.04. – физическая химия

### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время расширяется область применения устройств, которые работают на принципе автоэлектронной эмиссии. Вероятно, в большей степени это относится к использованию плоских дисплеев в промышленности, рекламе и в бытовых устройствах. Кроме этого можно отметить и другие применения, например, ионизаторы и рентгеновские трубки. С другой стороны, открытие углеродных нанотрубок, исследование их уникальных свойств и методов синтеза, свидетельствует о возможности их использования в качестве эффективных автоэмиссионных катодов. Сказанное выше определяет актуальность диссертационной работы Городецкого Д.В., которая посвящена исследованию путей синтеза для увеличения эффективности автоэмиссионных характеристик катодов на основе массивов многостенных углеродных нанотрубок.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация изложена на 134 страницах, содержит 64 рисунка и 6 таблиц, список литературы содержит 164 работы отечественных и зарубежных авторов. Работа состоит из введения, обзора литературы (гл.1), экспериментальной части (гл. 2), анализе результатов и их обсуждения (гл. 3) и выводов.

*Во введении* представлено обоснование актуальности работы, сформулирована цель исследований и постановка задач для ее достижения, определена научная и практическая значимость настоящих исследований.

*Первая глава* посвящена обзору литературных данных, соответствующих тематике диссертации. Проведен анализ основных механизмов и природы автоэлектронной эмиссии, как с плоских эмиттеров, так и с пространственных структур. Показано, что использование выступов с большим отношением длины к поперечному размеру происходит усиление электрического поля, что увеличивает плотность тока эмиссии в этой области. Описаны основные особенности использования массивов ориентированных УНТ в качестве автоэмиссионных катодов. Описаны факторы, влияющие на эффективность работы катодов и на скорость их деградации. Проведен обзор работ по CVD методу синтеза массивов УНТ. Оценен вклад основных параметров синтеза на рост УНТ. Изложены возможные методы модификаций массивов УНТ для применения в качестве автоэмиссионных катодов.

*Вторая глава* посвящена описанию экспериментальных установок и методов анализа синтезируемых образцов. Описан CVD-реактор, позволяющий контролировать рост массивов УНТ в режиме реального времени, что является важным параметром для синтеза массивов УНТ. Дано описание установок для модификации массивов УНТ. Наиболее важной для достижения целей работы является установка для исследования автоэмиссионных характеристик, которая позволяет проводить измерения с возбуждающим потенциалом до 6 кВ.

В *третьей* описана методика CVD-синтеза массивов УНТ с проведением дополнительного подбора параметров для более точного контроля высоты массива. Тщательно проведена характеристика всех полученных образцов с

использованием набора современных методов исследования. Проведено измерение автоэмиссионных свойств на вакуумной установке. Учтены особенности измерения основных автоэмиссионных параметров, таких как порог включения автоэлектронной эмиссии, однородность и плотность автоэмиссионного тока. Для проведения модификаций массивов УНТ использовались два направления: структурирование массивов УНТ на микроуровне и модификация торцов нанотрубок. Микроструктурирование позволяет усилить электрическое поле вблизи определенной структуры, но при этом снижается полная площадь эмиссии электронов. Одним из важных результатов является оптимизация параметров структурирования массивов углеродных нанотрубок, которая позволила примерно на порядок увеличить средний ток эмиссии. Проведен анализ влияния остаточных газов в измерительной камере автоэмиссионной установки на структуру катодов при уровне технического вакуума. Экспериментально показано, что модификации торцов УНТ с использованием плазменной обработки позволяет снизить порог включения автоэлектронной эмиссии. На основе аналитических исследований состава, морфологии, дефектности и определенных химических связей для исходных образцов и после различных воздействий выяснена природа наблюдаемого воздействия. На мой взгляд, это является наиболее важным научным результатом, полученным Дмитрием Владимировичем в диссертационной работе.

С практической стороны, проведенные исследования могут позволить значительно улучшить рабочие характеристики планарных автоэмиссионных катодов из массивов УНТ.

### **Научная новизна и достоверность полученных результатов.**

Большинство экспериментальных исследований выполнены с использованием современного аналитического оборудования, которое позволило получить широкий спектр информации об исследованных

образцах. Использовались следующие методы: оптическая и электронная микроскопии, спектроскопия комбинационного рассеяния света, рентгеновские методы исследования.

Новизна результатов подтверждается широким анализом мировой литературы и уровнем публикаций автора. Следует отметить, что существенная доля представленных результатов получена на международных научно-исследовательских станциях CIC Nanogune (Испания) и Русско-Германском канале Берлинского центра синхротронного излучения Bessy II (Германия). Также следует отметить методическую значимость диссертационной работы. В работе продемонстрировано удачное сочетание ряда инструментальных методик, установок по синтезу и модификации УНТ, измерительных станций.

### **Практическая значимость работы**

Применение лазерного профилирования, теневой литографии и плазменной обработки могут найти свое применение при создании автоэмиссионных катодов, способных длительное время работать в условиях технического вакуума. Модифицированные эмиттеры на основе массивов УНТ могут снизить требования к вакууму в электровакуумных устройствах, что позволит расширить области возможных применений.

### **Значение результатов диссертационной работы для науки и производства**

Важность работы и полученных результатов подтверждается публикациями по тематике работы в высокорейтинговых журналах, входящих в базу цитирования Web of Science. Результаты диссертации были представлены на всероссийских и международных научных конференциях.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы. Оформление диссертации и автореферата соответствует установленным требованиям. Содержание глав и параграфов соответствует

поставленным задачам. Анализ литературных данных, разработка методов синтеза и модифицирования массивов углеродных нанотрубок, проведение экспериментальных исследований и обработка результатов выполнены лично соискателем.

### **Замечания:**

1. Диссертационная работа Городецкого Д.В. представлена на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Проведенные исследования и полученные результаты соответствуют этому направлению. В то же время формулировки целей работы, сформулированных задач исследований, научной новизны, а также основных результатов носят выраженный технический характер. В частности, в основных результатах не присутствует выражение «получено впервые» и отсутствуют формулировки обнаруженных взаимосвязей влияния воздействий на исследуемый объект с результатами измерений характеристик исследуемых образцов.

2. В работе отсутствует анализ погрешностей измерений. Особую важность это имеет для измерений вольтамперных характеристик исследуемых катодов на разработанном оборудовании.

3. В диссертационной работе уделено большое внимание стабильности характеристик исследуемых катодов. Для характеристики этой величины используется термин «длительное время работы катода». Временная неопределенность этого термина не позволяет однозначно судить о стабильности исследуемых катодов в сопоставлении с уже использующимися на практике катодами.

4. Диссертация написана аккуратно, но все же удалось найти опечатки. Например, на стр. 113 (вторая строка выше рисунка № 62), вместо слова «измерению», следует читать «изменению».

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации. Поставленная цель была достигнута, а задачи исследования выполнены в полном объеме. В работе представлен большой объем

экспериментальных данных, интерпретация которых подтверждает обоснование выводов и говорит о высоком научном уровне работы и квалификации соискателя.

Считаю, что работа Городецкого Дмитрия Владимировича «МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАССИВЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ» отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Городецкий Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.04 – физическая химия.

Официальный оппонент:

ФИО: Новопашин Сергей Андреевич

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.02.05. - механика жидкости, газа и плазмы

Ученое звание: старший научный сотрудник

Должность: заведующий лабораторией

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук

Адрес: проспект Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия, 630090

Тел.: +7-9138908824

e-mail: [sanov@itp.nsc.ru](mailto:sanov@itp.nsc.ru)

Новопашин Сергей Андреевич

20 февраля 2019 г.



Подпись Новопашина С.А. удостоверяю,

Ученый секретарь ИТ СО РАН, к.ф.-м.н.



М. С. Макаров