

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и программ  
развития федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Московский физико-  
технический институт (национальный  
исследовательский университет)», к.ф.-м.н.



Баган Виталий Анатольевич

2019 г.

## ОТЗЫВ

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

### Оценка актуальности темы диссертационной работы

Исследование автоэмиссионных свойств катодов из УНТ является актуальной задачей при разработке и создании электровакуумных устройств. Адаптация катодов, работающих на принципах автоэмиссии, для использования в приборах с низким вакуумом позволит значительно увеличить степень их применения. Модификации ориентированных массивов УНТ, представленные в работе, позволяют решить ряд проблем, связанных с внедрением катодов на основе нанотрубок в различные электровакуумные приборы. Актуальность диссертационной работы Д.В. Гороцкого также подтверждается значительным ростом числа работ по различным модификациям автоэмиссионных катодов, как в фундаментальной, так и в прикладной области.

### Объем и структура диссертации работы

Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка цитируемой литературы из 164 источников, содержит 64 рисунка и 6 таблиц.

Во введении сформулированы актуальности, цель и задачи исследования.

В первой главе (литературный обзор) рассмотрен механизм возникновения автоэлектронной эмиссии, описаны методы синтеза массивов ориентированных УНТ. Показаны возможные методы модификации планарных катодов на основе

ориентированных УНТ. Описана литература, посвященная факторам, влияющим на автоэмиссионные свойства катодов. Затронуто важное направление, касающееся возможных дальнейших применений автоэммиттеров на основе модифицированных структур из УНТ.

Во второй главе (экспериментальная часть) описана используемая установка CVD синтеза массивов ориентированных УНТ с возможностью контроля за ростом в режиме *in situ*. Продемонстрированы установки и основные параметры приборов, используемых при модификации исходных массивов УНТ. Подробно описаны принципы измерения автоэмиссионных свойств, что является важной частью в данной исследовательской работе. Синтезируемые образцы анализировались с использованием ряда современных методов исследования, в том числе методами электронной микроскопии, рентгеновской и оптической спектроскопии.

Третья глава (результаты и их обсуждение) посвящена исследованию влияния различных модификаций массивов УНТ на их автоэмиссионные свойства, а также исследованию стабильности работы таких катодов в условиях технического вакуума. Глава состоит из трех частей: CVD-синтез массивов УНТ, автоэлектронная эмиссия массивов УНТ, влияние модификации массивов УНТ на автоэмиссионные свойства. В описании CVD-синтеза подробно описан механизм роста УНТ на кремниевых подложках, показаны микрофотографии высокого разрешения начального этапа данного процесса. Сделан упор на принципах проведения исследований автоэмиссионных свойств планарных катодов. Описаны физические явления, влияющие на значения основных показателей эффективности автоэмиссионного катода, включающие порог включения автоэлектронной эмиссии, плотность и однородность тока эмиссии.

Подробно и логически верно выстроена часть, посвященная проведению модификаций массивов УНТ для автоэмиссионных катодов. Создание столбиков из массивов УНТ как методом теневой литографии, так и методом лазерного профилирования позволяет повысить пространственную однородность, плотность тока автоэмиссии, а также понизить порог включения, что несомненно повышает эффективность катодов.

Оценка длительного тестирования профилированного массива в камере с давлением остаточных газов на уровне  $10^{-2}$  Па показало возможность работы катода в течение длительного времени. При подаче более 10000 пилообразных импульсов на катод ток автоэмиссии сократился не более чем на 10-15 % при подаче напряженности поля на уровне 1 В/мкм, что является достойным результатом в сравнении с имеющимися литературными данными.

Изменения структуры катодов из УНТ проводились и на микроуровне, путем обработки образцов водородной плазмой. Плазменная модификация привела к разрушению торцов УНТ, что повлияло на автоэмиссионные характеристики. Изменение формы эмитирующего торца трубки привело к понижению порога включения автоэлектронной эмиссии. Плазменную модификацию автор преподносит и как отдельный, самостоятельный метод обработки массивов УНТ, и как метод для возможной дополнительной обработки профилированного массива УНТ на отдельные столбики.

Таким образом, представленные методы модификации массивов УНТ в совокупности могут использоваться для создания эффективных планарных автоэмиттеров, способных длительное время работать в условиях недостаточного вакуума.

### **Научная новизна работы**

Впервые проведено систематическое исследование влияния параметров макро- и микро-структуры катода на основе массивов УНТ на автоэмиссионные свойства при работе в техническом вакууме. Показаны оптимальные размеры периодических столбиков из УНТ, позволяющие катоду стабильно работать на протяжении большого числа импульсов (более 10000). Изучено влияние тока автоэлектронной эмиссии на структуру столбиков после длительного тестирования образца, что полезно для понимания деградиационных процессов, происходящих в катоде.

### **Практическая значимость работы**

Показан принципиальный подход по созданию катодов на основе массивов ориентированных УНТ, способных длительное время работать в устройствах, поддерживающих уровень разряжения на уровне  $10^{-2}$  Па или лучше. Упрощение требований к электровакуумным приборам позволяет расширить популярность и увеличить производство автоэмиссионного катода на основе УНТ.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Часть результатов была опубликована в российских и зарубежных журналах, часть представлена на ряде профильных конференций.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Одной из целей работы постулировано определение влияния микро- и макроструктуры катода на автоэмиссионные свойства. Однако в тексте диссертации и в выводах не четко представлено, что именно автор подразумевает под «микро- и макроструктурами».

2. Одной из задач диссертационной работы является «модернизация CVD -реактора для получения массивов УНТ с высотой до 500 мкм». При этом, поставленной задаче автор уделяет недостаточное количество внимания, что, в том числе, не было отражено в выводах.

3. На рисунках 52 и 53 подпись к оси абсцисс должна быть «Энергия связи» вместо «Энергия фотона».

4. Интересно было бы провести в работе исследование по проведению модификации профилированного массива методом плазменного травления. Такое исследование явилось бы логическим продолжением и заключением работы.

### Заключение

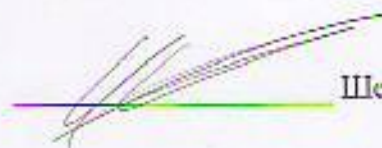
Указанные замечания не снижают достоинств работы. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

На основании вышесказанного можно сделать заключение о том, что диссертационная работа Городецкого Д.В. «МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАССИВЫ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ» нова, актуальна и содержит достоверные полученные результаты и выводы, а также имеет практическую значимость.

Диссертация отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Д.В.Городецкий заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 02.00.04 – физическая химия.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на научном семинаре кафедры вакуумной электроники физтех-школы электроники, фотоники и молекулярной физики 18 февраля 2019 г., протокол №02/19.

Заслуженный профессор МФТИ,  
заместитель заведующего кафедрой  
вакуумной электроники МФТИ  
д.ф.-м.н., профессор



Шешин Евгений Павлович

Почтовый адрес: 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Телефон: 8 (495) 408-59-44

Адрес электронной почты: sheshin.ep@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», кафедра вакуумной электроники

Должность: профессор

Web-сайт организации: <https://mipt.ru/>