

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 538.975, 537.533

Липский  
Дмитрий Анатольевич

Исследование импульсных характеристик полевых катодов на основе углерод-  
ных нанотрубок

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-41 80 03 нанотехнологии и наноматериалы  
(в электронике)

---

Научный руководитель  
Лабунов Владимир Архипович  
доктор технических наук  
академик НАН Беларуси

---

Минск 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Тенденция развития современных радиотехнических систем диктует требования увеличения рабочих частот, мощностей и надежности. Эти потребности стимулируют поиск перспективных решений, которые могут быть реализованы в виде сверхминиатюрных интегральных схем на основе технологий микроэлектроники. Однако, современная элементная база, основанная на использовании твердотельной электроники, обеспечить эти требования либо не в состоянии, либо требует применения различных схемотехнических и конструктивных решений. Как правило, при таких решениях приходится идти на компромисс - улучшая одни параметры, ухудшаются другие.

В поисках решения таких проблем, разработчики нередко идут на применение электровакуумных приборов. Это показывает, что многие типы электровакуумных приборов не только не потеряли актуальность в современных радиоэлектронных системах, но и продолжают интенсивно совершенствоваться, и, по-видимому, принципиально не могут быть заменены твердотельными приборами.

Особый интерес для развития таких технологий (а именно: устройства вакуумной микроэлектроники, в частности дисплеи, источники рентгеновского излучения и т.д.) представляют углеродные нанотрубки (УНТ). Углеродные нанотрубки чрезвычайно привлекательны для современных высоких технологий благодаря своим механическим и электронным свойствам, миниатюрным размерам, химической стойкости углерода. Благодаря большому отношению длины к диаметру и хорошей электропроводности вблизи концов УНТ уже при малых напряжениях возникает большая напряженность электрического поля, приводящая к появлению полевой электронной эмиссии. Таким образом, углеродные нанотрубки являются перспективными для создания на их основе низковольтных полевых электронных эмиттеров. Уже первые эксперименты подтвердили уникальные полевые эмиссионные характеристики УНТ. Классические полевые электронные эмиттеры из металлов острейного типа работают, как правило, при высоких напряжениях. Основное преимущество эмиттеров с углеродными нанотрубками - это возможность получения эмиссионного тока при низких напряжениях. Такая возможность связана с большим отношением длины нанотрубок к их диаметру, и, вследствие этого, очень сильной концентрацией электрического поля у кончика нанотрубки.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы магистерской диссертации.** Актуальность работы определяется необходимостью разработки новых катодов, которые могут использоваться в широком спектре устройств, начиная от дисплеев и заканчивая рентгеновскими трубками.

**Цель и задачи исследования.** Цель диссертационной работы состояла в исследовании импульсных эмиссионных характеристик полевых электронных эмиттеров с углеродными нанотрубками. В соответствии с поставленной целью, основными задачами работы являлись:

1. Создание полевого эмиссионного катода на основе углеродных нанотрубок.
2. Создание стенда для измерения импульсных характеристик полученного катода.
3. Анализ полученных результатов исследования импульсных характеристик полевых катодов.

**Объект и предмет исследования.** Объектом исследования являются полевые катоды на основе массивов углеродных нанотрубок. Предмет исследования – импульсные характеристики полученных полевых катодов.

**Основные положения, выносимые на защиту.** 1. При использовании для создания массивов УНТ таких углеводородов как этанол, смесь декана и 0,1% ферроцена, а также смесь этанола и 0,1% ферроцена, наиболее предпочтительным является выбор смеси декана и 0,1% ферроцена, так как массивы получаются более равномерными и, соответственно, более стабильными.

2. Полевой катод на основе УНТ способен работать в импульсном режиме. При этом плотность тока достигает значений в  $0,1 \text{ А/см}^2$  при приложенном напряжении в 800 – 1000 В.

**Личный вклад соискателя.** Все основные результаты и выводы получены соискателем самостоятельно. Аналитическое исследование современных методов получения углеродных нанотрубок проводилось соискателем лично. Во время работы над диссертацией соискателем были исследованы импульсные характеристики полевых эмиссионных катодов на основе углеродных нанотрубок. Разработка стенда для измерения импульсных эмиссионных характеристик проводилась совместно с научным сотрудником НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы» Тимощиком А. С.

**Апробация результатов диссертации.** По материалам диссертации опубликован 1 тезис на 51-ой научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Микро- и наноэлектроника»

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из следующих разделов: введение, четыре главы с описанием результатов исследований с выводами по каждой главе, заключение. Материал в главах диссертации изложен в следующей последовательности: анализ литературных данных по физическим основам полевой эмиссии, автоэмиссионные приборы, изготовленные на основе углеродных нанотрубок, описание синтеза и структурный анализ полученных полевых катодов, методы исследования структур, результаты исследования структурных, вольт-амперных характеристик полученных полевых катодов на основе УНТ.

Общий объем диссертационной работы составляет 57 страницы, из них 45 страницы основного текста, 35 рисунка на 16 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, библиографический список из 50 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** показана актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, изложены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу литературных данных о физических основах полевой эмиссии. Среди эмиссионных явлений автоэлектронная эмиссия занимает особое место, так как это чисто квантовый эффект, при котором для высвобождения электронов из катода не требуется затрат энергии на сам эмиссионный акт в отличие от термо-, фото- и вторичной эмиссии. Рассмотрены основные эффекты, возникающие при полевой электронной эмиссии.

Во **второй главе** описаны методы синтеза углеродных нанотрубок, а также механизмы, имеющие место в некоторых методах. Также в этой главе рассмотрены основы полевой эмиссии из углеродных нанотрубок, как одностенных, так и многостенных, а также влияние соседних нанотрубок в массивах.

В **третьей главе** представлены описание оборудования и методик для синтеза массивов УНТ, а также представлена методика формирования топологии локализованного катализатора на кремниевой подложке. Слои алюминия и никеля, играющие роль катализатора, наносились на подложку методом магнетронного распыления с толщинами 10 и 1 нм соответственно. Для формирования рисунка топологии использовался метод косвенной («взрывной») фотолинтографии. Такой метод был выбран в виду того, что при прямой фотолинтографии происходит электрохимическая коррозия алюминия в присутствии никеля в воде и технологических растворах на её основе. А это ведет к потере элементов топологии, а также неоднородному по высоте росту углеродных нанотрубок.

Изготовление серии образцов катодов проводился при неизменной температуре синтеза УНТ, с неизменной скоростью подачи жидкого углеводорода и неизменной скоростью потока газа – носителя. Вариация параметров процесса производилась по времени роста, по применяемому жидкому углеводороду и наличию восстанавливающего агента (водорода). Температура синтеза составила 700 °С. Скорость подачи жидкого углеводорода составила 0,18 см<sup>3</sup>/мин.

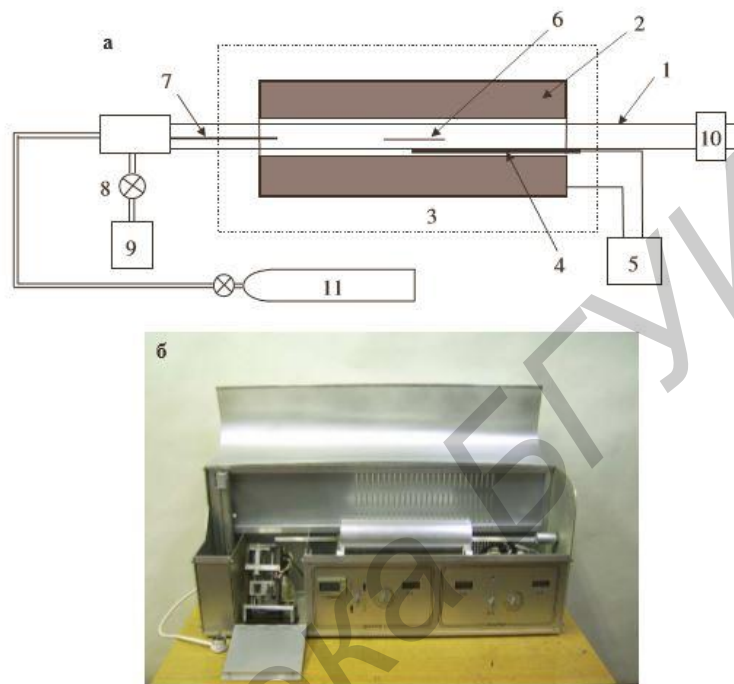


Рисунок 10 – Схема установки для получения нанотрубок методом химического осаждения

В **четвертой главе** представлены результаты исследования морфологии полученных образцов, приведены вольт-амперные характеристики некоторых образцов. С целью определения равномерности эмиссии с массива УНТ были проведены исследования в вакуумной камере с катодом, прикрепленном к экрану с люминофором.

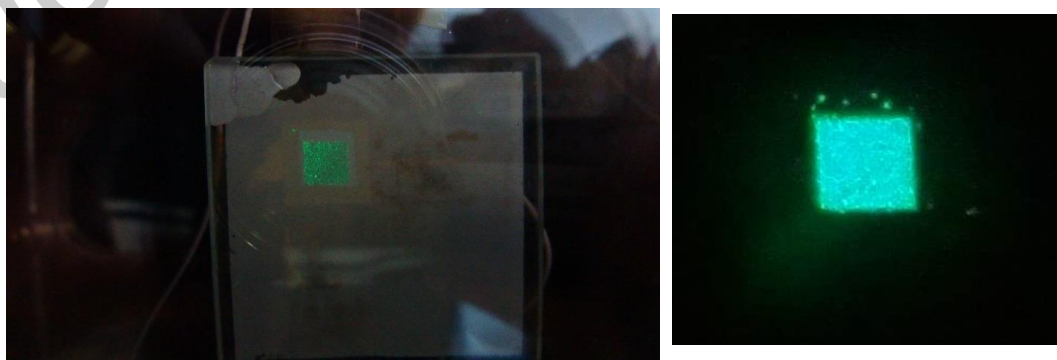


Рисунок 22 – Светимость образца катода

Также в главе представлена схема установки для проведения исследования импульсных характеристик полевых катодов на основе УНТ, содержащую в себе формирователь импульса. Формирователь импульса в свою очередь представляет следующее: полевой транзистор, который служит ключом для подачи напряжения до 1 кВ на испытуемый объект; драйвер, для управления полевым транзистором; а также генератор сигналов с частотой 400 Гц и одновибратор, который формирует сигнал необходимой нам длительности.

Данный раздел также включает в себя РЭМ-фотографии образцов, которые уже использовались, и были разрушены, полностью или частично. В данном разделе представлены вольт-амперные характеристики полевых эмиссионных катодов, полученные в импульсном режиме с частотой 400 Гц с длительностью импульса 5 мс. Сделаны выводы о качестве полученных катодов, возможности их приборного применения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании углеродных нанотрубок был произведен анализ существующих вариантов синтеза, выбран оптимальный вариант, удовлетворяющий условиям технического задания, в следствие чего были выбраны наиболее перспективные варианты синтеза углеродных нанотрубок, пригодных для использования в полевых катодах.

В данной работе, на основе методов синтеза углеродных нанотрубок с учетом современных требований был создан полевой эмиссионный катод на основе углеродных нанотрубок в НИЛ 4.6 «Интегрированные микро- и наносистемы».

Равномерность полученных массивов была подтверждена с помощью установки, в которой в вакуумной камере крепился образец с люминофором. С помощью визуальной оценки установлено – эмиссия с массива углеродных нанотрубок идет равномерно.

На планарных слоях с множеством углеродных нанотрубок получен импульсный эмиссионный ток с плотностью тока до 0,1 А/см<sup>2</sup>. Средняя относительная флуктуация эмиссионного тока для разных образцов лежала в диапазоне 0,1 – 0,7 %. Такие эмиттеры могут быть использованы в целом ряде вакуумных электронных приборов, например, в мощных СВЧ приборах для систем связи, а также для создания рентгеновских трубок.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Липский, Д. А. Исследование импульсных характеристик полевых катодов на основе углеродных нанотрубок / Д.А. Липский //51-я научно-техническая конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР «Микро- и наноэлектроника». – Минск, 2015.

Библиотека БГУИР