

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –  
проректор по научной работе МФТИ,  
д.т.н., профессор



О.А. Горшков

« 06 » октября 2014г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Израэльянца Карена Рубеновича  
«ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК В  
ПОСТОЯННОМ И СЛАБОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПОЛЯХ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Интерес к углеродным нанотрубкам возник еще в начале 90-х годов прошлого века сразу после их открытия. Уже в ходе первых исследований была отмечена возможность создания на основе углеродных нанотрубок низковольтных автоэлектронных эмиттеров. Однако, хотя с момента открытия уникальных эмиссионных свойств углеродных нанотрубок прошло уже более 15 лет, до сих пор остается много вопросов как фундаментального, так и прикладного плана.

Диссертационная работа К.Р. Израэльянца посвящена решению наиболее интересных и важных проблем, связанных с исследованием автоэлектронной эмиссии из углеродных нанотрубок, а именно, созданию низковольтных автоэлектронных эмиттеров, разработке стабильных сильноточных автоэлектронных эмиттеров, исследованию влияния субмоноатомных и моноатомных слоев атомов щелочных металлов на автоэмиссионные характеристики углеродных нанотрубок, а также исследованию автоэлектронной эмиссии из углеродных нанотрубок в присутствии слабого высокочастотного электрического поля. Поэтому ее актуальность не вызывает сомнений.

В диссертационной работе К.Р. Израэльянца было получено много новых, интересных научных результатов. Наиболее важные научные результаты состоят в следующем:

1. Для планарных слоев с очень длинными и редкими углеродными нанотрубками (нанонитями) получена низковольтная автоэлектронная эмиссия с пороговым электрическим полем  $E = 0,07$  В/мкм, и коэффициентом усиления электрического поля  $\beta = 45000$ . Это значение  $\beta$  в десятки раз превышает величины  $\beta$ , обычно приводимые в литературе для планарных слоев с углеродными нанотрубками. Показано, что под действием электростатических сил эти нанотрубки вытягиваются по направлению к аноду.

2. Обнаружено, что длинные одиночные нанотрубки в таких слоях при протекании больших эмиссионных токов нагреваются до яркого свечения, видимого невооруженным глазом. Интенсивное свечение эмитирующих нанотрубок/нанонитей позволяет визуально определить их размеры и структуру. При этом плотность эмиссионного тока  $j$  для единичной нанотрубки диаметром 50 нм достигает величины  $j \approx 5 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>.

3. Сильное свечение нанотрубок обнаружено также в планарных эмиттерах с большой плотностью нанотрубок при протекании по эмитирующим нанотрубкам больших эмиссионных токов с плотностью в несколько сотен мА/см<sup>2</sup>. Изучено пространственное (по поверхности эмиттера) распределение интенсивности этого свечения. Это дало возможность определить участки эмиттера, откуда исходит основная эмиссия электронов

4. Показано, что нанесение атомов Cs на чистые ОСНТ приводит к понижению порогового электрического поля от 1,2 В/мкм до 0,8 В/мкм и снижению работы их выхода до значения  $\phi = 3$  эВ. В случае нанесения атомов K, минимум работы выхода составлял  $\phi = 3,95$  эВ. Вольтамперные характеристики автоэлектронной эмиссии в обоих случаях подчиняются теории Фаулера-Нордгейма.

5. Обнаружено, что нанесение атомов Cs на слои с ОСНТ после нанесения на них атомов K, не только резко увеличивает величину эмиссионного тока, но и приводит к сильной нелинейности вольтамперной характеристики в координатах Фаулера-Нордгейма. Вид характеристики становится подобным эмиссионным характеристикам полупроводников p-типа. Предполагается, что этот эффект объясняется возникновением полупроводниковой проводимости p-типа эмитирующих ОСНТ вследствие интеркаляции атомов K и Cs в ОСНТ. Сильное электрическое поле, прикладываемое к ОСНТ для получения эмиссионного тока, проникает в ОСНТ и вызывает образование p-n перехода вблизи кончиков ОСНТ. При протекании большого эмиссионного тока часть приложенного напряжения падает на p-n переходе, что приводит к нелинейности вольтамперной характеристики.

6. В ходе исследований по влиянию слабого высокочастотного электрического поля на автоэлектронную эмиссию из УНТ, на частотной зависимости эмиссионного тока обнаружена серия узких пиков в диапазоне частот  $f \approx 50 - 1200$  МГц. Проведенный анализ на основе теории колебаний позволил сделать вывод, что эти пики связаны с резонансом основной моды и 2-ой гармоники вынужденных механических колебаний УНТ.

Практическая значимость диссертационной работы К.Р. Израэльянца состоит в следующем:

1. На планарных слоях с многостенными углеродными нанотрубками получена стабильная автоэлектронная эмиссия с плотностью тока более  $1 \text{ A/cm}^2$ . Средняя относительная флюктуация эмиссионного тока для разных образцов лежала в диапазоне 0,1 – 0,7 %. Такие эмиттеры могут быть использованы в мощных СВЧ приборах.

2. Продемонстрирована стабильная работа планарного автоэлектронного эмиттера в течение более 70 часов в техническом вакууме в качестве катода малогабаритной рентгеновской трубки. Этот результат

показывает возможность создания промышленных электронных приборов с эмиттерами на основе углеродных нанотрубок.

В отношении интерпретации результатов по влиянию атомов щелочных металлов на эмиссионные характеристики одностенных углеродных нанотрубок следует сделать следующее замечание. Диссертант полагает, что изменение формы вольтамперных характеристик эмиссионного тока после нанесения атомов Cs и K объясняется возникновением полупроводниковой проводимости р-типа эмитирующих одностенных углеродных нанотрубок вследствие интеркаляции атомов K и Cs. Однако это предположение выглядит недостаточно обоснованным. По нашему мнению следовало бы провести анализ других возможных причин возникновения этого эффекта.

В целом диссертационная работа К.Р. Израэльянца выполнена на высоком научном уровне и содержит решение задач в области автоэлектронной эмиссии из углеродных нанотрубок, имеющих важное значение для развития физики конденсированного состояния. Отмеченный недостаток не меняет положительной оценки диссертации.

Результаты, полученные в диссертации К.Р. Израэльянца были использованы при выполнении НИР в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и могут быть использованы в ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, МГИЭТ, МГУ им. М.В. Ломоносова, НПП «Торий» (г.Москва), НИИ «Платан» (г.Фрязино), НИИ «Волга» (г.Саратов), и других организациях, занимающихся исследованием углеродных наноструктур и разработкой приборов с эмиттерами на их основе.

Основные результаты диссертации докладывались на 18-й Международной конференции по вакуумной наноэлектронике, Великобритания, Оксфорд, 2005г., 7-ой Международной конференции «Фуллерены и атомные кластеры», Россия, Санкт-Петербург, 2005г., 9-ой Международной конференции «Фуллерены и атомные кластеры», Россия, Санкт-Петербург, 2009г. Работа неоднократно обсуждалась на научных семинарах ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. По

результатам диссертации опубликовано 9 научных статей, из них 4 работы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

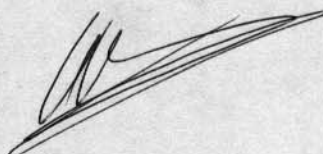
Новизна полученных автором результатов не вызывает сомнения. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации. Таким образом, диссертация Израэльянца К.Р. удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа и отзыв обсуждались на заседании семинара кафедры вакуумной электроники Московского физико-технического института.

Отзыв одобрен на семинаре кафедры вакуумной электроники.

Протокол № 4/14 от 02 октября 2014 г.

Отзыв составил: Зам.зав.кафедрой,  
д.ф.-м.н., профессор



/Е.П. Шешин/

ФИО: Шешин Евгений Павлович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 01.04.07

Почтовый адрес: 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер. 9,  
МФТИ, Кафедра вакуумной электроники

Телефон: +7 (495) 408 59 44

Адрес электронной почты: sheshin.ep@mipt.ru

Наименование организации: Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Должность: профессор