

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу Израэльянца Карена Рубеновича "Эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок в постоянном и слабом высокочастотном электрических полях» по специальности 01.04.07 - "Физика конденсированного состояния"

Диссертационная работа К.Р. Израэльянца посвящена исследованию эмиссионных характеристик планарных автоэлектронных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок в режиме большой плотности тока, планарных слоев с очень длинными и редкими углеродными нанотрубками, а также исследованию влияния субмоноатомных и моноатомных слоев щелочных металлов на автоэлектронную эмиссию из одностенных и многостенных углеродных нанотрубок. Кроме того изучались эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок в присутствии высокочастотного электрического поля. Несмотря на то, что к настоящему времени имеется ряд работ по исследованию планарных эмиттеров с большой плотностью тока, до сих пор не было получено стабильных характеристик. Практически не изучалась эмиссия из очень длинных и редко расположенных углеродных нанотрубок, а между тем именно в таких структурах, согласно расчетам, должна наблюдаться низковольтная эмиссия с очень малыми значениями порогового электрического поля и высокого коэффициента усиления электрического поля. Практически не изучено влияние интеркалирования на автоэлектронную эмиссию из углеродных нанотрубок: по имеющимся у меня данным есть всего несколько работ на эту тему. До настоящего времени не были исследованы высокочастотные характеристики эмиттеров на основе углеродных нанотрубок в присутствии слабого высокочастотного электрического поля. Исходя из вышесказанного, тема диссертационной работы представляется весьма актуальной.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы. Первая глава является обзорной, вторая – методической. Остальные представляют собой оригинальные результаты автора.

В *первой* обзорной главе рассмотрены структура углеродных нанотрубок, методы их получения. Далее представлена теория автоэлектронной эмиссия Фаулера – Нордгейма и экспериментальные исследования автоэлектронной эмиссия из углеродных нанотрубок. Интересным представляется обзор по влиянию механических колебаний углеродных нанотрубок в переменном электрическом поле на их эмиссионные характеристики. По результатам обзора автор делает выводы и формулирует задачи исследований.

Во *второй* методической главе автор описывает стенд для проведения эмиссионных исследований, приводит схему измерений и программное обеспечение. Рассматривается

также методика измерений радиочастотных характеристик эмиттеров с углеродными нанотрубками.

Остановимся на наиболее значительных, с моей точки зрения, достижениях автора. Глава три посвящена изучению автоэлектронной эмиссии из различных планарных эмиттеров с углеродными нанотрубками. Здесь представлены эмиссионные характеристики эмиттеров малой площади  $\sim 10^{-3} \text{ см}^2$  в режиме большой плотности тока. Эмиттеры таких размеров использовались для того, чтобы избежать перегрева анода. До диссертационной работы Израэльянца К.Р. стабильно работающих эмиттеров с большой плотностью тока изучено не было. В работе впервые показано, что можно получить стабильную эмиссию с плотностью тока до  $1,4 \text{ А/см}^2$  и относительной флуктуацией эмиссионного тока не более 0,5%. Вольтамперные характеристики таких эмиттеров хорошо описываются теорией Фаулера-Нордгейма.

В этой же главе проведены исследования низковольтной автоэлектронной эмиссии на планарных слоях с длинными и редкими нанотрубками. Получен принципиально важный результат: очень низкое пороговое электрическое поле (для лучших образцов оно составляло  $0,07 \text{ В/мкм}$ ) и очень высокий коэффициент усиления электрического поля  $\beta=45000$ . Такая величина  $\beta$  согласуется с теоретическими расчетами, имеющимися в литературе, для использованной геометрии нанотрубок.

Впервые на обоих типах эмиттеров наблюдается интенсивное свечение нанотрубок в видимом диапазоне. Обнаруженное явление открывает новые возможности в определении параметров нанотрубок, например, становится возможным визуально определить длину нанотрубок, их количество. Мне кажется очень интересным продолжить исследование этого эффекта.

В следующей главе четыре исследована автоэлектронная эмиссия углеродных нанотрубок интеркалированных атомами щелочных металлов (цезием и калием). Интеркалирование проводилось путем нанесения в сверхвысоком вакууме атомов щелочных металлов на планарные слои с одностенными и многостенными углеродными нанотрубками. Среди проведенных исследований совершенно новым результатом является наблюдение сложной формы вольтамперной эмиссионной характеристики в координатах Фаулера-Нордгейма на образцах одностенных нанотрубок с последовательно нанесенными атомами калия и цезия по сравнению с отдельно нанесенными атомами калия или цезия, где вольтамперные характеристики являются прямолинейными в координатах Фаулера-Нордгейма. Основываясь на сравнении характеристик, полученных на образцах с одностенными нанотрубками с эмиссионными характеристиками полупроводников  $p$ -типа кремния и германия, автор объясняет такое поведение возникновением в нанотрубках проводимости  $p$ -типа. Однако каких либо прямых доказательств существования областей  $p$ -

типа не получено. По моему мнению требуются дополнительные исследования в этой области.

В *пятой* главе изучалось влияние слабого высокочастотного электрического поля на автоэлектронную эмиссию из углеродных нанотрубок. Автор изготавливал образцы эмиттеров, представляющие собой небольшие кусочки депозита (аморфного углерода с отдельными углеродными нанотрубками) приклеенные к остриям стальных игл. В таких образцах отдельные прямые углеродные нанотрубки могли совершать механические колебания в электрическом поле. На этих структурах была реализована демодуляция высокочастотного электрического сигнала. Следует отметить, что автором впервые измерены в широком диапазоне частотные характеристики демодулированного сигнала, вклад в который могут давать несколько присутствующих в депозите углеродных нанотрубок. На этих характеристиках наблюдаются серии отдельных узких пиков, которые интерпретируются автором как основные частоты механических колебаний нанотрубок и их гармоники, частоты которых согласуются с теорией. Кроме эксперимента, автором были проведены расчеты величины демодулированного сигнала. В качестве замечания можно высказать следующее: в диссертации крайне коротко, бегло объясняется, почему рассчитанные значения амплитуд демодулированного сигнала не совпадают с экспериментом. Мне кажется, что этому вопросу следовало уделить больше внимания.

*Шестая* глава имеет большое практическое значение, поскольку в ней показано, что эмиттер на основе углеродных нанотрубок стабильно работает в течение многих часов не только в экспериментальной сверхвысоковакуумной камере, но и в рабочем макете малогабаритной рентгеновской трубки в условиях технического вакуума.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено много новых и интересных особенностей автоэлектронной эмиссии из катодов на основе различных углеродных нанотрубок.

Замечания, высказанные выше в отзыве, не снижают хорошей оценки диссертационной работы в целом. Диссертация К.Р. Израэльянца представляет собой законченную фундаментальную научную работу в актуальном направлении физики конденсированного состояния. В диссертации решены важные задачи, связанные с автоэмиссионными характеристиками структур с углеродными нанотрубками. Научные положения работы и выводы хорошо обоснованы. Достоверность результатов обусловлена использованием апробированных экспериментальных методик, воспроизводимостью экспериментальных результатов и подтверждается перекрестным характером проведенных опытов. Представленные результаты, помимо несомненного фундаментального интереса, полезны и для практических целей. Как уже отмечалось, в диссертационной работе

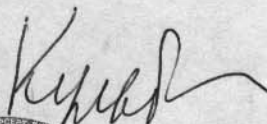
получены катоды на основе углеродных нанотрубок, стабильно работающие в малогабаритных рентгеновских трубках в условиях технического вакуума.

Полученные результаты рекомендуется использовать в академических институтах: ИРЭ РАН, ФИ РАН, ИФТТ РАН, ИФП РАН, в лабораториях МГУ имени М.В. Ломоносова, СПбГУ, СПбГПУ, ННГУ, НИЦ "Курчатовский институт". Результаты работы опубликованы в журналах из списка ВАК, многократно докладывались К.Р. Израэльянцем на Всероссийских и Международных конференциях. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

В целом диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержащимся в Положении о присуждении ученых степеней, а ее автор К.Р. Израэльянц заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.


20.10.2014

Профессор,  
доктор физико-математических наук

 (В.А. Кульбачинский)

Подпись профессора В.А. Кульбачинского удостоверяю,  
Декан физического факультета МГУ  
профессор



 (Н.Н. Сысоев)

**ФИО:** Кульбачинский Владимир Анатольевич

**Ученая степень:** доктор физ.-мат. наук

**Специальность:** 01.04.07- физика конденсированного состояния

**Почтовый адрес:** 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет

**Телефон:** 8(495)939-11-47;

**Адрес электронной почты:** kulb@mig.phys.msu.ru

**Наименование организации:** Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет;

**Ученое звание :** профессор

**Должность:** профессор кафедры физики низких температур и сверхпроводимости.