

ОТЗЫВ

официального оппонента д.-ф.-м. н. Ильичева Эдуарда Анатольевича на диссертацию Израэльянца Карена Рубеновича «Эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок в постоянном и слабом высокочастотном электрических полях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Израэльянца Карена Рубеновича посвящена сравнительным исследованиям эмиссионных характеристик автоэммиттеров на основе углеродных нанотрубок различной геометрии, в том числе и в условиях модификации их поверхности щелочными металлами, а также в присутствии высокочастотных электрических полей.

Актуальность сформулированной цели исследований несомненна, ведь речь идет об исследованиях активных сред потенциально способных быть эмиссионными средами сильноточных автокатодов силовой электроники, в том числе и силовой СВЧ электроники, определяющей стратегическую безопасность страны.

Действительно, в условиях сверхлинейного роста потоков информации и необходимости превышения величины скорости ее передачи в десятки Гбит/с требуется освоить диапазон частот в сотни гигагерц, что невозможно без создания сильноточных усилительных элементов с высоким КПД и плотностью рабочих токов в $10-100 \text{ A/cm}^2$. Важно также, чтобы приборы на основе таких элементов обладали приемлемой радиационной стойкостью и были способны работать в широком диапазоне температур.

Вакуумная эмиссионная электроника - одно из перспективных направлений, удовлетворяющих заданным требованиям. Базовым элементом вакуумных приборов, определяющим их рабочие характеристики, является катод. Стремление повысить мобильность вакуумных приборов и устройств, их КПД, а также значительно уменьшить массу и габариты диктует необходимость разработки сильноточных автокатодов с большим рабочим ресурсом. Однако, несмотря на многолетние поиски многочисленных групп отечественных и иностранных исследователей до сих пор не удалось разработать стабильные сильноточные автокатоды с плотность тока большей $0,1 \text{ A/cm}^2$ в режиме постоянного тока, и большей 1 A/cm^2 для работы в импульсном режиме. Причина тому - низкий порог текучести исходных материалов, отсутствие технологий формирования массивов наноразмерных острий с малой дисперсией аспектных отношений, проблемы, связанные с отводом тепла от наноразмерных острий, а также недопустимо большие величины потенциальных барьеров автоэмиссионных острий на основе металлов и

полупроводников. Как результат - отсутствие сильноточных автокатодов, малый рабочий ресурс автоэмиссионных сред, высокий уровень электрических шумов.

Появление углеродных нанотрубок, объектов с большим аспектным отношением, обладающих, к тому же значительной прочностью, твердостью, упругостью и высокой теплопроводностью, вселило надежду на возможность их успешного использования в качестве базовых эмиссионных сред для автокатодов. Однако этого не произошло.

Поэтому исследования базовых эмиссионных сред на основе УНТ для автокатодов и приборов на их основе является актуальным и своевременным.

В процессе исследований диссертант решал следующие задачи:

1. Исследовал эмиссионные характеристики планарных автоэлектронных эмиттеров в режимах большой плотности тока $\sim 1 \text{ А/см}^2$.
2. Исследовал эмиссионные характеристики автоэмиссионных сред на основе длинных углеродных нанотрубок при малой плотности их расположения.
3. Исследовал влияние субмоноатомных и моноатомных слоев щелочных металлов на автоэлектронную эмиссию из одностенных и многостенных углеродных нанотрубок.
4. Исследовал эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок в присутствии высокочастотного электрического поля.

Результаты исследований диссертантом автоэмиссионных структур на основе углеродных нанотрубок различной геометрии, различных способов активации их поверхности и в различных внешних условиях, были им использованы при оптимизации автоэмиссионной среды с целью ее применения в качестве активной среды автокатодов для рентгеновской трубки. Изучение рабочих характеристик рентгеновской трубки с автокатодом на основе углеродной среды включающей углеродные нанотрубки, последующее сравнение ее характеристик с характеристиками рентгеновских трубок традиционной архитектуры позволяет судить о возможности и эффективности использования обсуждаемых автоэмиссионных сред в указанном качестве. Это позволяет выявить основные их преимущества и недостатки, в чем и состоит практическая ценность работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы. Во введении определена область исследований, обоснована актуальность поставленной цели и сформулированных для ее реализации задач. Здесь же

сформулированы научная новизна, практическая значимость, приведены основные положения выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена аналитическому обзору работ, представленных в научной периодике. Анализ представленных результатов, их сравнение с потенциально ожидаемыми результатами, позволил оценить состояние разработок, обозначить основные проблемы, сформулировать цель, задачи и пути их решения.

Вторая глава диссертации посвящена разработке и описанию измерительного стенда. Стенд позволил выполнять исследования автоэмиссионных характеристик как в режимах постоянного тока, так и в малосигнальном режиме.

Третья глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям эмиссионных характеристик автоэмиссионных сред включающих углеродные нанотрубки различной геометрии и различной плотности их расположения на подложке. Изучены особенности поведения автоэмиссионных сред в режимах больших плотностей токов. Обращено внимание на наблюдаемое интенсивное свечение поверхности автоэмиссионной автоэмиссионной среды в видимом спектральном диапазоне в режиме больших плотностей тока. Изучены особенности эмиссии электронов автоэмиссионными средами с различной геометрией углеродных нанотрубок. В частности, обнаружен высокий коэффициент усиления электрического поля и аномально низкие значения порогового электрического поля для с малой плотностью расположения на подложке длинных одностенных углеродных нанотрубок (2-4 нм) покрытых оболочкой (толщиной до 50 нм) из аморфного углерода.

В четвертой главе диссертации изучались свойства одностенных и многостенных углеродных нанотрубок, поверхность которых активировалась атомами щелочных металлов. Описаны и обоснованы процедуры активации и их последовательность. Систематизированы наблюдаемые модификации характеристик автоэмиссионных сред. Акцентировано внимание на значительности изменений пороговых полей и работы выхода в вакуум электронов из эмитирующих сред.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию влияния на автоэлектронную эмиссии из углеродных нанотрубок слабого высокочастотного поля. В качестве автоэмиссионной среды здесь был взят композитный слой в составе аморфного углерода с включениями УНТ, при малой плотности их расположения по плоскости образца. Диссертантом была разработана геометрия эксперимента, проведены исследования,

предложена интерпретация наблюдаемых результатов и выполнены теоретические оценки.

Шестая глава диссертации посвящена изучению возможности использования автокатодов на основе углеродных материалов с доминирующими включениями в виде УНТ при изготовлении миниатюрных рентгеновских трубок. Изучены рабочие характеристики рентгеновской трубки, разработан режим управления ее питанием, позволяющий стабилизировать характеристики автокатада миниатюрной рентгеновской трубки на протяжении семи десятков часов работы.

В Заключении диссертации обобщены основные результаты работы.

Диссертационная работа, однако, не свободна и от недостатков.

К таковым, на мой взгляд, следует отнести следующие утверждения диссертанта.

1. Является спорной, на мой взгляд, данная автором интерпретация эволюции характеристик автоэмиссионной среды на основе УНТ с поверхностью активированной посредством последовательного нанесения на нее атомов калия и цезия. Автор предлагает гипотезу, объясняющую наблюдаемую эволюцию автоэмиссионных характеристик в процессе изменения напряженности электрического поля образованием на автоэмитирующих остриях р-п переходов, из-за интеркаляции в УНТ атомов калия и цезия. Однако, никаких доказательств образования на остриях УНТ р-п переходов автор не приводит.

2. Стабильность (с точностью до 11 %) исследуемой автоэмиссионной среды на основе планарного массива УНТ в качестве активной среды автокатада малогабаритной рентгеновской трубки была продемонстрирована автором на протяжении испытаний в течении 70 часов, порциями по 5-6 часов в сутки (ток в трубке ~ 300 мкА, при напряжениях в 1,7-1,8 кВ); на мой взгляд, для утверждений о пригодности исследуемых автоэмиссионных сред для промышленных применений таких испытаний недостаточно.

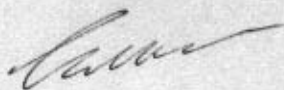
Отмеченные недостатки не умаляют значимости полученных диссертантом результатов. Результаты новы и оригинальны, достаточно полно представлены в периодической печати, и апробированы на научных конференциях.

Автореферат и опубликованные автором работы полностью отражают содержание диссертации, а ее название соответствует содержанию. Диссертация К.Р. Израэльянца является целостным и законченным исследованием, в котором решены важные задачи, связанные с автоэлектронной эмиссией из структур с углеродными нанотрубками различной модификации. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым

ВАК к кандидатским диссертациям. Израэльянц Карен Рубенович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

29.10.2014 г.

Доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина»



Э. А. Ильичев

Подпись Э.А. Ильичева удостоверяю.

Зам. директора ФГУП «НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина»



В.А. Дождёв

ФИО: Ильичев Эдуард Анатольевич

Ученая степень: доктор физ.мат. наук

Специальность: 05.27.01 – твердотельная электроника, микроэлектроника

Почтовый адрес: 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806 дом 5

Телефон: 8495731 9843

Адрес электронной почты: edil44@mail.ru

Наименование организации: НИИФП им. Ф.В. Лукина

Ученое звание: старший научный сотрудник

Должность: в.н.с. отдел «Нанoeлектроники» (№85) НИИФП им. Ф.В. Лукина