

Сезонов Вячеслав Евгеньевич

**ПОЛЕВАЯ ЭМИССИЯ ИЗ КОНТАКТА
МАТЕРИАЛОВ С РАЗНОЙ РАБОТОЙ ВЫХОДА**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в Высшей инженерно-физической школе Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: **Соминский Геннадий Гиршевич**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Морев Сергей Павлович**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
Акционерное Общество «Научно-
Производственное Предприятие «Торий»
г. Москва

Павлов Виктор Георгиевич
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»,
г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное
учреждение «Федеральный исследовательский
центр Институт прикладной физики Российской
академии наук», г. Нижний Новгород

Защита состоится «03» июня 2021 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.01.04.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», расположенного по адресу: Санкт-Петербург, 195251, Политехническая ул., 29, корпус IV, аудитория № 305.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru>, федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт - Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «___» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.01.04.04,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Соловьев Константин Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Полевые эмиттеры выгодно отличаются от термокатодов, так как не требуют накала, способны обеспечивать существенно большие плотности токов и практически безынерционны. Учитывая эти их особенности, в последние годы делаются попытки использовать полевые эмиттеры в востребованных на практике миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах, в частности, в СВЧ устройствах терагерцового и субтерагерцового диапазона частот, а также в мобильных и малогабаритных источниках рентгеновского излучения. Однако использованию полевых эмиттеров в такого типа приборах препятствует их невысокая долговечность. Основные причины выхода из строя полевых эмиттеров в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме, - распыление их поверхности под действием бомбардировки ионами остаточного газа, а также разрушение эмиттеров из-за перегрева эмиттирующих электроны структур при отборе больших токов и/или под действием пондеромоторных сил.

Для создания у поверхности катода необходимых для получения интенсивной полевой эмиссии больших по величине полей (порядка или даже более $(2-4) \cdot 10^7$ В/см) при умеренных рабочих напряжениях приходится формировать на этой поверхности усиливающие поле структуры. Такие структуры очень чувствительны к разрушающему действию ионной бомбардировки и перегреву. Разрушение усиливающих поле структур под действием этих факторов приводит к деградации катода и выходу его из строя.

Представляется актуальным поиск методов создания достаточно больших электрических полей, необходимых для полевой эмиссии, в условиях, когда не требуется создание усиливающих поле структур.

Целями диссертационной работы являются доказательство возможности использования полей у контакта материалов с разной работой выхода для получения интенсивной и стабильной полевой эмиссии, разработка источников полевой эмиссии, созданных на основе приведенных в контакт материалов с разной работой выхода, определение закономерностей и механизма полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.

Для достижения указанных целей необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать технологию создания эмиттеров на основе контакта материалов с разной работой выхода и изготовить опытные образцы эмиттеров.
2. Разработать методы моделирования, расчета и экспериментального исследования полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.
3. В расчетах и экспериментально исследовать закономерности полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода и построить модель эмиссии под действием полей контактной разности потенциалов.
4. Разработать электронно-оптические системы с полевыми эмиттерами, построенными на основе контакта материалов с разной работой выхода, для формирования электронных потоков в миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах.

Научная новизна работы. Основные результаты работы получены впервые:

1. Доказана возможность получения интенсивной и стабильной полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода $e\phi$ (под действием полей

контактной разности потенциалов КРП) в миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах.

2. Разработана технология создания многослойных наноструктурированных эмиттеров из приведенных в контакт материалов с разной работой выхода.
3. Разработаны методы моделирования, расчета и экспериментального исследования полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.
4. Определены закономерности и механизмы полевой эмиссии многослойных наноструктурированных эмиттеров из приведенных в контакт материалов с разной работой выхода.
5. Получены данные, свидетельствующие о возможности использования многослойных эмиттеров для формирования электронных потоков высокой плотности (несколько сотен А/см²) в миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах, стабильно работающих в условиях технического вакуума (10^{-7} - 10^{-8} Торр).

Практическая значимость работы заключается в выявлении неизвестного ранее перспективного механизма получения полевой эмиссии с использованием электрических полей у контакта материалов с разной работой выхода, в разработке методов создания распределенных систем, включающих большое количество (до 40-50) приведенных в контакт пар нано-слоев материалов с разной работой выхода, в создании многослойных эмиттеров, обеспечивающих получение рекордно больших по сравнению с другими существующими распределенными системами средних по поверхности плотностей тока полевой эмиссии до нескольких сотен А/см² и способных стабильно работать в техническом вакууме высоковольтных электронных приборов в условии интенсивной ионной бомбардировки.

Объекты и методы исследования.

Объектами исследования были:

- композиты из гранул гексаборида лантана и карбида гафния в оболочках из пирографита, а также прессованные образцы из гранул чистого гексаборида лантана;
- образцы катодов на вольфрамовой подложке из одной - двух приведенных в контакт пар слоев индия и молекул фуллерена C₆₀;
- многослойные (до 100 пар слоев) эмиттеры из приведенных в контакт слоев иттербия и углерода, иттербия и вольфрама, а также из гафния и платины на подложке из монокристалла арсенида галлия;
- многослойные (20 пар слоев) эмиттеры из приведенных в контакт слоев гафния и платины на тонкой (9 мкм) гибкой подложке из алюминия;
- многослойные (20 пар слоев) эмиттеры из приведенных в контакт слоев гафния и платины на тонкой (10 мкм) гибкой подложке из тантала;
- электронно-оптические системы (ЭОС) с многослойными полевыми эмиттерами для формирования плоских в сечении электронных потоков и электронных потоков кольцевого сечения.

Работа выполнена с использованием комплекса методов, включающих в себя экспериментальные исследования перечисленных выше объектов, а также численное моделирование и расчеты закономерностей их полевой эмиссии и движения эмитированных полевыми эмиттерами электронов.

Для определения структуры и химического состава поверхности исследуемых эмиттеров использовались современные методы растровой электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

Работа созданных эмиттеров исследована в импульсном и непрерывном режимах, в условиях технического вакуума.

Расчеты выполнены с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Поля у контакта материалов с разной работой выхода могут быть использованы для получения интенсивной и стабильной полевой эмиссии в миниатюрных, но высоковольтных электронных приборах.
2. Для получения интенсивной полевой эмиссии со средними по поверхности плотностями тока до $300\text{--}450\text{ А/см}^2$ могут быть использованы многослойные катоды, включающие не более 40-50 пар нано-слоев материалов с разной работой выхода.
3. Стабильную полевую эмиссию в высоковольтных электронных приборах, работающих в условиях технического вакуума, могут обеспечить многослойные полевые эмиттеры на монокристаллической подложке (например, из арсенида галлия), а также на тонкой (9-10 мкм) металлической подложке (например, из алюминия или тантала) с суммарной толщиной многослойной структуры не более 300-400 нм.
4. Токи полевой эмиссии многослойных катодов определяются потоками электронов из переходных областей между слоями с малой и большой работой выхода.
5. Токи эмиссии многослойных катодов увеличиваются с ростом количества пар слоев с разной работой выхода, с увеличением разности работ выхода примыкающих друг к другу слоев, с уменьшением толщины слоев с большей работой выхода и с увеличением толщины слоев с меньшей работой выхода.
6. Оптимальны толщины слоев многослойных катодов с большей работой выхода примерно 2 нм. Оптимальная толщина слоев с меньшей работой выхода зависит от суммарной толщины слоистой структуры и, например, при суммарной толщине 400 нм имеет величину 10-20 нм.
7. Разработанные многослойные полевые эмиттеры могут быть использованы для формирования плоских и кольцевых в сечении электронных потоков для высоковольтных электронно-пучковых приборов.

Достоверность полученных результатов определяется использованием современных экспериментальных методик, а также методов расчета, воспроизводимостью результатов, использованием лицензионного программного обеспечения, согласием полученных результатов с существующими литературными данными в случаях, когда такое сопоставление возможно.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях и семинарах, в частности на: 38-ой (Майнц, Германия, 2013), 43-ей (Нагоя, Япония, 2018), 44-ой (Париж, Франция, 2019) международной конференции "Infrared, Millimeter and Terahertz Wave", IRMMW-THz; 14-ой международной конференции "International Baltic Conference on Atomic Layer Deposition", BALD. (Санкт-Петербург, 2016); 10-ой международной конференции "International Vacuum Electron Sources Conference", IVESC, и 2-ой международной конференции "International Conference on Emission Electronics", ICEE (Санкт-Петербург, 2014); 18-ой международной конференции "International Vacuum Electronics

Conference", IVEC (Лондон, Англия, 2017); 10-ом международном семинаре "International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", (Нижний Новгород – Москва, 2017); 12-ой международной конференции Advanced Carbon NanoStructures (Санкт-Петербург, 2015); научно-практических конференциях с международным участием в рамках недели науки СПбПУ (Санкт-Петербург, 2015-2018 гг.); всероссийской молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники», (Уфа, 2012); научной школе молодых ученых по вакуумной микро и наноэлектронике (VMNE-YR, Санкт-Петербург, 2017).

Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении работ по гранту РФФИ № 11-02-00425, гранту Правительства по договору №11.G34.31.0041 с Министерством образования и науки Российской Федерации, гранту РНФ № 16-12-10010, по грантам правительства Санкт-Петербурга 2014 и 2016 года, а также по гранту УМНИК (№9556p/14193 от 04.07.2011).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе: 9 статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов и зарегистрированных в международных базах данных Scopus и WoS, 2 патента на полезную модель, а также 6 работ - материалы докладов на конференциях.

Личный вклад автора в выполненные работы

Автор активно участвовал в разработке технологии создания исследованных полевых эмиттеров, в разработке методики экспериментального изучения характеристик полевых эмиттеров и в создании экспериментальной установки. Он был основным исполнителем всех экспериментальных исследований. Автор внес основной вклад в разработку методов расчета характеристик слоистых полевых эмиттеров и выполнил расчеты, приведенные в диссертации. Он совместно с руководителем разработал модель полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 123 страницах, содержит 70 рисунков. Список литературы включает 114 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю профессору Соминскому Геннадию Гиршевичу за постановку задачи, проведение совместных исследований и обсуждение результатов работы, всему коллективу лаборатории сильноточной и СВЧ электроники СПбПУ, в особенности Тумаревой Татьяне Алексеевне и Тарадаеву Евгению Петровичу за помощь в работе, а также Габдуллину Павлу Гарифовичу, Архипову Александру Викторовичу и Мишину Максиму Валерьевичу за техническую помощь в изготовлении многослойных структур и контроле их характеристик.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении к диссертационной работе обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели работы, определены решаемые в ней задачи, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, указаны

объекты исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены свидетельства достоверности полученных в диссертации результатов, описан личный вклад автора в выполнение работы, сообщается об апробации работы и о публикациях по теме диссертации, приведены данные о ее структуре, дано краткое описание содержания диссертации.

Первая глава посвящена рассмотрению в обзоре литературы современного состояния исследований по теме диссертации. Основное внимание уделено имеющимся данным о наиболее перспективных распределенных полевых эмиттерах, обеспечивающих токи и плотности тока эмиссии, достаточные для обеспечения работы миниатюрных, но высоковольтных электронных приборов.

Препятствием широкому использованию полевых эмиттеров является невысокая их долговечность в условиях, когда они могут быть разрушены под действием ионной бомбардировки, интенсивной в высоковольтных устройствах, работающих в техническом вакууме, а также под действием пондеромоторных сил и/или из-за перегрева при отборе большого тока. Рассматриваются используемые на практике способы защиты от ионного распыления катодов. Описываются катодные системы, не требующие формирования на своей поверхности неровностей рельефа, предназначенных для усиления внешнего поля. Высказывается предположение о возможности и перспективности использования для получения полевой эмиссии полей у контакта материалов с разной работой выхода.

На основе проведенного анализа литературных данных сформулированы задачи данной диссертационной работы.

Во второй главе приведено описание методик создания и экспериментального исследования, а также расчета характеристик эмиттеров, использующих для получения полевой эмиссии контакты материалов с разной работой выхода.

Основные экспериментальные исследования всех образцов, проводились в разборной металлической вакуумной камере при типичном техническом давлении остаточных газов $\sim 10^{-7}$ - 10^{-8} Торр. На начальном этапе исследований все катоды подвергались длительной, порядка нескольких часов, тренировке с отбором тока.

Были исследованы LaB_6 -С композитные катоды, состоящие из гранул гексаборида лантана LaB_6 ($e\phi \approx 2,5\text{--}3,8$ эВ) в матрице из пирогرافита ($e\phi \approx 4,7$ эВ), HfC -С катоды из гранул карбида гафния HfC ($e\phi \approx 3,0\text{--}4,0$ эВ) в такой же матрице, а также однородные по химическому составу катоды из гексаборида лантана ($e\phi \approx 3,7$ эВ). Значения работ выхода материалов определялись в основном из [1]. Для однородных по химическому составу катодов из гексаборида лантана значение работы выхода определялось по термоэмиссионным характеристикам. Все катоды имели форму дисков диаметром 20 мм и толщиной 1 мм.

Измерения характеристик композитных и гексаборид-лантановых катодов проводились с использованием триодной системы, состоящей из катода, управляющего электрода - сетки, установленной на расстоянии 2,5-3 мм от катода, и люминесцентного экрана. Наблюдение засветки экрана, бомбардируемого потоком электронов, позволяло выявлять неоднородности в распределении плотности тока эмиссии с поверхности катода.

Помимо композитных и гексаборид-лантановых катодов были созданы и исследованы катоды из небольшого количества (до 4) примыкающих друг к другу нано-слоев индия ($e\phi_{\text{In}} \sim 3,7\text{--}4,1$ эВ) и молекул фуллерена C_{60} ($e\phi_{\text{C}_{60}} \sim 5,3$ эВ [2]). Так, для создания W+In+C_{60} катода на боковую поверхность вольфрамовой ленты

($e\phi_w \sim 4,5$ эВ) толщиной 10 мкм, использовавшейся в качестве подложки, термически напылялся тонкий (несколько нм) слой индия, а затем поверх него слой молекул фуллерена C_{60} . Для создания катода $W+In+C_{60}+In+C_{60}$ с двумя парами слоев индия и фуллеренов поверх созданной системы $W+In+C_{60}$ напылялись последовательно еще один слой индия, а затем еще один слой молекул C_{60} .

В описанной системе со слоями индия и фуллеренов на тонкой вольфрамовой подложке существовала возможность, нагревая подложку пропусканием тока через нее, удалять покрытие, а затем наносить покрытие снова. Это обеспечивало возможность неоднократно воспроизводить измерения и оперативно исследовать характеристики катодов со слоями разной толщины. Однако эта эмиссионная структура, создаваемая с помощью термического напыления, практически неприменима для нанесения тугоплавких материалов. Кроме того, она не обеспечивает больших скоростей формирования покрытий.

Для создания катодов с многослойными покрытиями применялся гораздо более оперативный метод магнетронного напыления. Многослойные системы формировались на подложках из высокоомного монокристалла арсенида галлия толщиной 430 мкм и металлических фольг из алюминия и тантала толщиной 9 и 10 мкм соответственно. Были исследованы три пары материалов, сильно отличающихся значениями работы выхода $e\phi$: иттербий ($e\phi_{Yb} \sim 3,1$ эВ) - вольфрам ($e\phi_w \sim 4,5$ эВ), иттербий - углерод ($e\phi_c \sim 4,7$ эВ), гафний ($e\phi_{Hf} \sim 3,5$ эВ) - платина ($e\phi_{Pt} \sim 5,3$ эВ) [1].

Экспериментальное изучение как созданных термическим напылением на вольфрамовую подложку структур, так и многослойных эмиттеров проводилось в триодных системах: катод - сетчатый управляющий электрод или управляющий электрод со щелью - коллектор. Была изучена работа плоских катодов (длиной 2 мм на GaAs подложке и 5 мм на Al фольге) и кольцевых катодов (диаметром 14 мм на Al и Ta фольгах). Ширина катод-анодного зазора для плоских катодов составляла 1 мм, а для катодов кольцевого сечения - 1,3 мм. В измерительной системе регистрировались токи электронов, эмитированных катодом, и токи, попадающие на коллектор, а также перехватываемые управляющим электродом.

Чтобы лучше разобраться в механизме и закономерностях полевой эмиссии многослойных катодов, а также для получения информации, необходимой для оптимизации создаваемых структур, наряду с экспериментальными исследованиями, были выполнены расчеты с использованием стандартной программы COMSOL Multiphysics. Рассчитывались распределение суммарного электрического поля E у поверхности эмиттера с учетом напряжения U между катодом и управляющим электродом, а также полей контактной разности потенциалов между слоями с разной работой выхода. Далее с использованием уравнения Фаулера-Нордгейма определялось распределение плотности тока эмиссии с поверхности катода и рассчитывались траектории электронов в зазоре катод - управляющий электрод. На рис.1 схематически изображены типичные для всех исследованных многослойных катодов сечение участка модельного диода с многослойным катодом в области выделенного контакта слоев с разной работой выхода и траектории e электронов (рис.1а), а также распределения поля E и работы выхода $e\phi$ на этом участке (рис.1б). Анод модельного диода располагался на расстоянии h от катода. Форма и потенциал U_{AM} модельного анода соответствовали проходящей на этом расстоянии эквипотенциали в диоде с плоскими анодом. В расчетах учитывалось существование

переходных областей между слоями материалов с разной работой выхода, в которых существует смесь материалов (заштрихованная область на рис.1а).

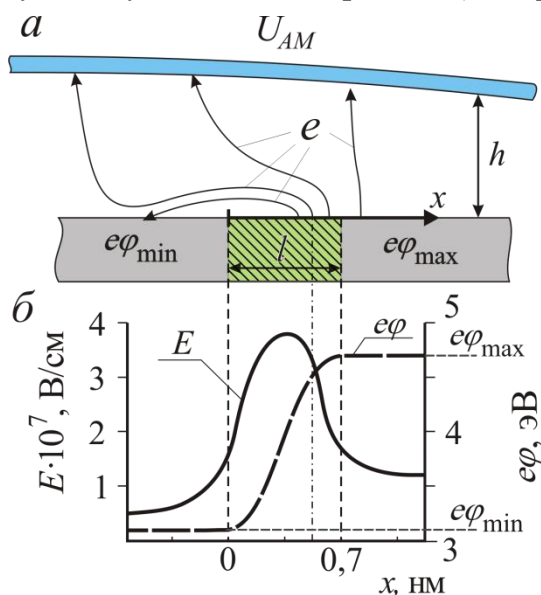


Рис 1 а - Сечение участка модельного диода с многослойным катодом в области выделенного контакта слоев с разной работой выхода. Показаны траектории электронов e .

б - распределения вдоль оси x поля E и работы выхода $e\varphi$.

Для исследованных многослойных катодов были решены модельные задачи в широком интервале основных параметров: толщины слоев материала с меньшей работой выхода $1 \leq d_{\min} \leq 70$ нм и слоев с большей работой выхода $1 \leq d_{\max} \leq 10$ нм, ширины переходной области $0,4 \leq l \leq 1,2$ нм, величины разницы работ выхода $0,5 \leq \Delta e\varphi \leq 2,5$ эВ между слоями с разной работой выхода, количества пар слоев $10 \leq N \leq 80$, расстояния $50 \leq h \leq 200$ нм, а также величины анодного напряжения $4 \leq U \leq 12$ кВ. Распределение работы выхода в переходной области описывалось функцией вида

$$e\varphi(x) = e\varphi_{\min} + \Delta e\varphi / 2 \cdot (1 \pm \cos[\pi x / l]),$$

где $e\varphi_{\min}$ – работа выхода материала с меньшей работой выхода, $\Delta e\varphi$ – разность работ выхода приведенных в контакт слоев, l – ширина переходной области, x – координата вдоль переходной области (см. рис. 1а).

Третья глава посвящена описанию основных результатов работы.

В параграфе 3.1 описаны результаты исследования композитных катодов из гранул гексаборида лантана и гранул карбида гафния в оболочке из пирогرافита. Эти данные сопоставляются с результатами исследования химически однородных катодов из гексаборида лантана. Именно в этих исследованиях получена первичная информация о возможности получения полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.

Перед началом измерений, каждый композитный катод подвергался длительной (десятки часов) тренировке (формовке) с отбором токов полевой эмиссии. В первые несколько часов после начала тренировки композитным катодам была свойственна неоднородная по поверхности и скачкообразно меняющаяся во времени эмиссия. В процессе тренировки ток эмиссии менялся и становился более однородно распределенным по поверхности, что регистрировалось с помощью экрана с люминофором.

После окончания формовки для всех катодов измерялись вольтамперные характеристики (ВАХ). Для исследованных композитных катодов токи эмиссии достигали значений ~ 100 мкА с площади 3 см^2 . При этом среднее поле у поверхности катодов, определяемое отношением напряжения прикладываемого между сеткой и катодом к расстоянию между этими электродами, не превышало $\sim (3-4) \cdot 10^4$ В/см, чего недостаточно для получения зарегистрированной полевой эмиссии в модели Фаулера-Нордгейма.

Получение anomalно больших токов эмиссии можно было бы оправдать усилением поля на неровностях рельефа композитных материалов. Однако, как показали исследования, проведенные с помощью растрового электронного

микроскопа, усиление поля на неровностях не превышает 30-50 раз, чего недостаточно, чтобы объяснить аномально большие токи при помощи неровностей рельефа. Аномально низкие пороги полевой эмиссии регистрировались и ранее [3-13]. Аномальную эмиссионную активность связывали, например, с существованием в приповерхностном слое заряженных дефектов, облегчающих выход электронов в вакуум [10], либо с особенностями электронной структуры этой области у границы твердого тела [11-13]. Однако наряду с приведенными механизмами, а может быть и в большей степени, по крайней мере, для исследованных композитных катодов, эмиссия определяется полями контактной разности потенциалов, возникающими при тесном соседстве материалов с разной работой выхода. В пользу того, что именно действие полей контактной разности потенциалов определяет аномально высокую полевую эмиссию исследованных композитных катодов, говорит сравнение измеренных для них автоэмиссионных характеристик с характеристиками химически однородного катода из гексаборида лантана. Было установлено, что при примерно равных средних по поверхности полях токи, отбираемые с химически однородного гексаборид - лантанового катода, на 2-3 порядка меньше, токов с композитных катодов. При этом средняя по поверхности работа выхода химически однородного гексаборид - лантанового катода существенно ниже, чем у композитных катодов, что, казалось бы, должно было обеспечить более высокую по сравнению с композитами эмиссию.

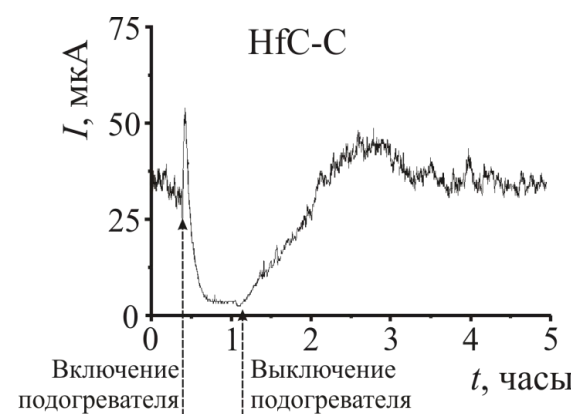


Рис. 2 Изменения во времени тока I эмиссии HfC-C катода, происходящие при изменении его накала. Стрелками отмечены моменты включения и выключения подогревателя.

Исследования эмиссионных характеристик композитных катодов выявили сильную зависимость отбираемого тока от температуры образца. На рис.2 показаны изменения во времени тока эмиссии HfC-C катода после включения и выключения его накала. Так, на начальном этапе повышение температуры от комнатной примерно до 700-800° K приводило к быстрому росту тока, которое через 1-2 минуты сменялось резким спадом, с последующей стабилизацией эмиссии на уровне ~10-20% от начального тока. После отключения накала в течении 1-2 часов эмиссионная активность катода возвращалась к величине, практически соответствующей состоянию до включения

подогревателя. Начальный кратковременный рост тока эмиссии при повышении температуры обусловлен десорбцией остаточных газов с поверхности катода. Очистка поверхности катода от остаточных газов приводит к увеличению разности работ выхода и контактной разности потенциалов между очищенными материалами, что ведет к росту полей у контакта материалов с разной работой выхода. Последующий резкий спад тока эмиссии можно связать с увеличением расстояния между границами материалов с разной работой выхода (и уменьшением полей в области их контакта) вследствие их неодинакового термического расширения. Временной интервал между включением накала и началом спада тока эмиссии определяется временем, необходимым для разогрева катода.

Описанное поведение композитных катодов в корне отличается от такового для химически однородного LaB_6 катода, не имеющего на поверхности сильных полей контактной разности потенциалов. Нагрев химически однородного катода до температур менее 1160°K слабо влияет на его эмиссию. Лишь при достижении температуры 1250°K происходит заметный рост отбираемого тока, связанный, по всей видимости, с появлением тока термоэмиссии.

Исследованные катоды сложны по химическому составу и морфологии и поэтому для того, чтобы убедиться в правильности предложенной интерпретации результатов требуется дополнительная экспериментальная проверка на более простых по структуре и химическому составу эмиссионных системах. В связи с этим, было решено исследовать катоды, образованные приведенными в контакт слоями материалов с разной работой выхода с четко заданными характеристиками рельефа и химического состава, а именно, слоистые катоды на вольфрамовой подложке.

В параграфе 3.2 приведены результаты исследования эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода, нанесенных термическим испарением на вольфрамовую подложку.

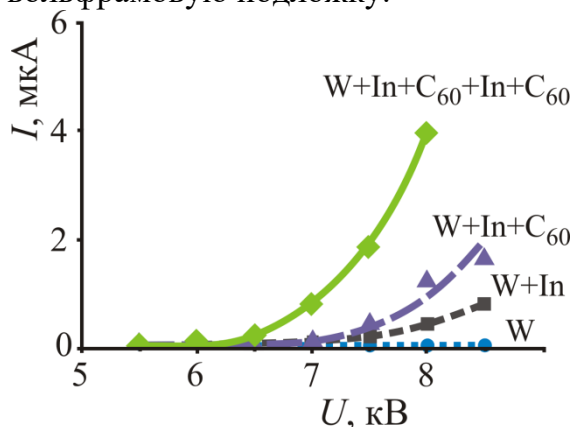


Рис. 3. Вольтамперные характеристики вольфрамовой ленты (W), а также W+In, W+In+C₆₀ и W+In+C₆₀+In+C₆₀ катодов.

Токи эмиссии с торца предварительно отожженной при температуре 1200°K чистой вольфрамовой подложки (кривая W) не превышали 5 нА во всем интервале рабочих напряжений (см. рис.3). Нанесение на боковую поверхность вольфрамовой ленты слоя индия с меньшей, чем у вольфрама, работой выхода, толщиной много меньше толщины вольфрамовой ленты (ориентировочно 10-20 монослоев) привело к заметному (более 100 раз) увеличению тока полевой эмиссии с торца такой системы (кривая W+In). Увеличение тока полевой эмиссии можно было бы связать с

уменьшением работы выхода тонкого слоя у границы катода. Однако оказалось, что нанесение поверх индия фуллеренового покрытия, толщиной в несколько монослоев и обладающего существенно большей работой выхода, ведет не к уменьшению тока эмиссии, а к еще большему (более двух раз) его увеличению (кривая W+In+C₆₀). При нанесении слоев индия и фуллеренов не происходит, видимо, существенного усиления поля у границы катодной системы. Поэтому описанное возрастание токов можно связать с появлением эмиссии из приведенных в контакт слоев вольфрама и индия, а также индия и фуллеренов. Нанесение дополнительной пары слоев индия и фуллеренов привело к росту тока еще примерно в 3 раза (кривая W+In+C₆₀+In+C₆₀). Такой рост тока пропорционален увеличению количества контактов индия с фуллеренами.

Полученные данные давали основание надеяться, что существенно большие токи полевой эмиссии могут быть получены с многослойных систем, включающих количество пар слоев с разной работой выхода $N \gg 2$. К сожалению однако, получить надежные данные о работе катодных систем с большим количеством пар приведенных в контакт с помощью термического напыления слоев индия и фуллеренов не удалось. Препятствовало этому, прежде всего, то обстоятельство, что

при использованном способе нанесения покрытий трудно избежать попадания части напыляемого вещества на торцевую эмитирующую поверхность катода. Полученные данные свидетельствовали о необходимости очистки структуры из контактирующих слоев с разной работой выхода на торцевой поверхности многослойных систем от такого сорта "загрязнений".

Термическое напыление покрытий трудно использовать для создания многослойных систем не только по указанной причине. Во-первых, таким способом практически невозможно наносить тугоплавкие материалы. Во-вторых, при использовании такого способа невелика скорость нанесения покрытий. Существенно большую скорость нанесения покрытий, причем практически из любых тугоплавких материалов, может обеспечить хорошо отработанный к настоящему времени метод магнетронного напыления.

В параграфе 3.3 описаны результаты исследования многослойных полевых эмиттеров, созданных с использованием магнетронного напыления. Экспериментально и в расчетах изучено функционирование структур, сформированных из слоев иттербия и углерода (Yb-C катоды), а также из гафния и платины (Hf-Pt катоды). Многослойные структуры создавались на монокристаллических подложках из арсенида галлия, а также на тонких металлических подложках из алюминиевой и танталовой фольги. У катодов на GaAs подложке скол монокристалла с нанесенной на его боковую поверхность многослойной структурой позволял удалить "загрязнения", возникающие на торцевой (эмитирующей) ее поверхности в процессе магнетронного напыления. Для решения той же задачи у катодов на подложке из металлической фольги производился срез фольги с предварительно нанесенной на ее боковую поверхность слоистой структурой.

Как следует из проведенных расчетов, из-за усиления поля у внешней границы слоистой структуры распределение тока полевой эмиссии существенно неоднородно по ее сечению. Учитывая это обстоятельство, для повышения однородности распределения тока эмиссии по сечению структуры на внешнюю ее границу наносился практически не эмитирующий толстый (толщиной 20 нм) слой материала с большей работой выхода $e\phi$ (углерода в случае Yb-C катодов и платины в случае Hf-Pt катодов).

Экспериментально были исследованы характеристики Yb-C структур, включающих до 100 пар слоев с разной работой выхода. Оказалось, что Yb-C катоды, включающие до 40 пар слоев, достаточно стабильно работают в широком интервале отбираемых токов, ориентировочно до 150 мкА. Катоды же с количеством пар слоев $N > 40-50$ разрушались при отборе токов порядка 20-30 мкА. Разрушение Yb-C катодов с $N > 40-50$ можно объяснить, видимо, уменьшением их прочности с ростом количества пар слоев из-за сильно отличающихся по физическим свойствам приведенных в контакт материалов. Принимая во внимание указанные результаты, в исследованиях многослойных катодов было решено ограничиться рассмотрением функционирования структур, включающих не более 40 пар слоев.

Экспериментально и в расчетах было изучено влияние на полевую эмиссию Yb-C и Hf-Pt катодов толщины d и разницы работ выхода $\Delta e\phi$ слоев, а также количества N пар слоев приведенных в контакт материалов. Было установлено, что

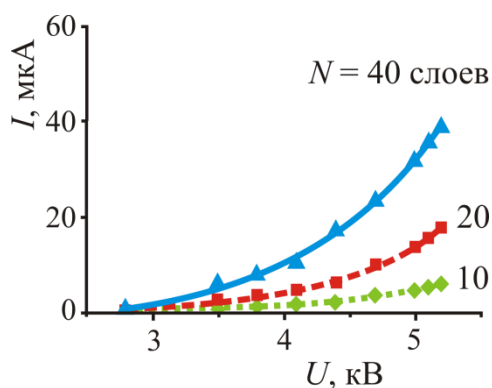


Рис. 4 ВАХ многослойных Yb-C катодов с разным количеством пар слоев иттербия и углерода. $N = 10, 20, 40$, $d_{Yb} = 5$ нм, $d_C = 2$ нм.

токи эмиссии приблизительно линейно увеличиваются с ростом N . Иллюстрирует изменения тока с ростом N рис.4, на котором приведены ВАХ Yb-C катодов с разным количеством пар слоев иттербия и углерода.

Первые данные о влиянии толщины слоев на эмиссионные характеристики катодов были получены в экспериментальных исследованиях Yb-C и Hf-Pt катодов со слоями материалов разной толщины. Более детально влияние толщины слоев было изучено в расчетах. Расчеты, выполненные в широком интервале изменения толщин слоев иттербия и гафния $1,5 \leq d_{Yb/Hf} \leq 70$ нм, а также углерода и платины $1,5 \leq d_{C/Pt} \leq 10$ нм, показали

(см. рис.5), что увеличение толщины слоев материала с большой работой выхода ведет к снижению отбираемого тока. Увеличение же толщины слоев материала с малой работой выхода сопровождается быстрым ростом тока полевой эмиссии, во всяком случае, в интервале толщин $d_{Yb/Hf}$ до 20-25 нм. Расчетные данные находятся в хорошем согласовании с экспериментом.

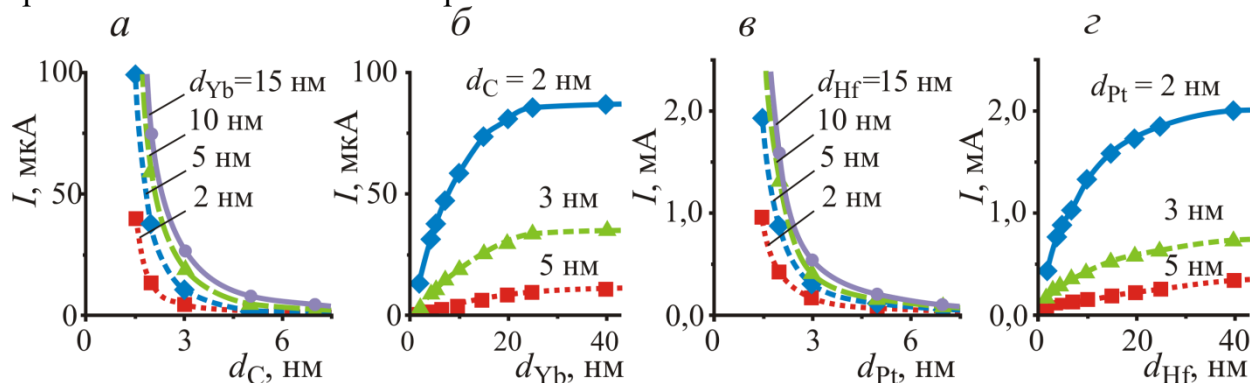


Рис. 5 Расчетные зависимости I от d_C (а) и d_{Yb} (б) для многослойных Yb-C катодов и от d_{Pt} (в) и d_{Hf} (г) для многослойных Hf-Pt катодов, состоящих из $N = 40$ пар слоев, при $U = 6$ кВ.

Полученные расчетные данные свидетельствуют о возможности оптимизации структуры катодов. Однако эти расчеты не учитывают некоторых особенностей слоистых структур, создаваемых методом магнетронного напыления, а также литературных данных. Известно, например, что при нанесении методом магнетронного напыления слоев толщиной менее 1-2 нм трудно обеспечить их высокую однородность (см., например, [14-16]). Также из литературных данных следует, что используемые на практике многослойные структуры, суммарная толщина которых d_{Σ} больше 300-400 нм, как правило, недостаточно прочны и могут быть разрушены при отборе тока, например, под влиянием даже слабых тепловых воздействий или под влиянием пондеромоторных сил [17].

Учитывая сказанное, было решено толщину слоев с большей работой выхода в слоистых структурах выбирать равной 2 нм. Для определения же оптимальной толщины слоев с меньшей работой выхода были проведены расчеты эмиссионных характеристик слоистых систем с разной суммарной толщиной d_{Σ} структуры. Такие расчеты были выполнены как для Yb-C, так и для Hf-Pt катодов. Результаты расчетов приведены на рис.6. На основе полученных расчетных данных были определены оптимальные толщины слоев иттербия и гафния, а затем и оптимальное количество

пар слоев в структуре. Установлено, что, например, при предельно допустимой суммарной толщине 400 нм оптимальна толщина слоев иттербия 10-15 нм, а гафния ~20 нм. При этом оптимальное количество пар N слоев в структуре Yb-C примерно равно 24-33 парам, а для Hf-Pt структуры ~18 парам.

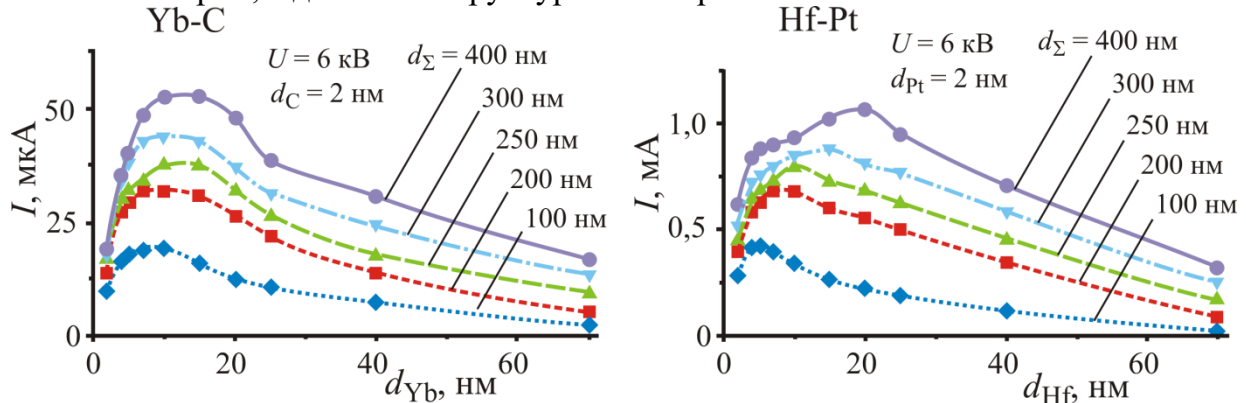


Рис. 6 Расчетные зависимости тока эмиссии I от d_{Yb} многослойного Yb-C катода и от d_{Hf} многослойного Hf-Pt катода с суммарными толщинами многослойной структуры $d_{\Sigma} = 100, 200, 250, 300, 400$ нм, полученные при $d_{C/Pt} = 2$ нм и $U = 6$ кВ.

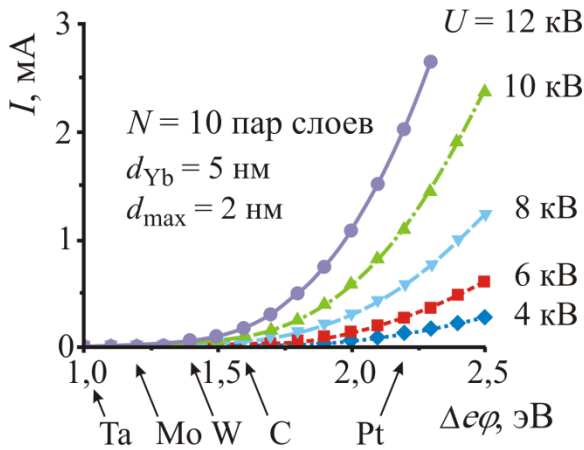


Рис. 7 Расчетная зависимость I от $\Delta\phi$ многослойного Yb-C катода с $N = 10$ пар слоев при $U = 4, 6, 8, 10, 12$ кВ. Стрелками отмечены материалы (Ta, Mo, W, C, Pt), которым соответствуют приведенные на оси абсцисс значения $\Delta\phi$.

Для оценки влияния разности работ выхода $\Delta\phi$ на эмиссию слоистых катодов были проведены расчеты, в которых в качестве материала с меньшей работой выхода брался Yb, а работа выхода материала с большей работой выхода варьировалась таким образом, чтобы величина $\Delta\phi$ менялась в пределах $0,5 \leq \Delta\phi \leq 2,5$ эВ.

Расчеты, представленные на рис.7, показали, что ток эмиссии с катода практически экспоненциально возрастает с ростом разницы работ выхода $\Delta\phi$ и замена, например, вольфрама ($e\phi_W \sim 4,5$ эВ) углеродом ($e\phi_C \sim 4,7$ эВ) в качестве материала с большей работой выхода позволяет в несколько раз увеличить ток

эмиссии многослойного катода. Существенно большее увеличение эмиссионных токов достигается при замене углерода или вольфрама платиной ($e\phi_{Pt} \sim 5,3$ эВ).

Для экспериментального подтверждения результатов расчета были измерены эмиссионные характеристики многослойных катодов, отличающихся величиной $\Delta\phi$. Сравнивались, например, вольтамперные характеристики Yb-W ($\Delta\phi_{Yb-W} \sim 1,4$ эВ) и Yb-C ($\Delta\phi_{Yb-C} \sim 1,6$ эВ) катодов, сформированных на подложке из арсенида галлия. Вольтамперные характеристики представлены на рис.8. Слои углерода и вольфрама имели одинаковую толщину $d_C = d_W = 2$ нм, слой иттербия имел толщину $d_{Yb} = 5$ нм. В структуре обоих катодов было одинаковое количество (10) пар иттербия и углерода/вольфрама. Как показали измерения, ток эмиссии с Yb-W катода существенно (в 3,3 раза) меньше, чем с Yb-C катода, несмотря на то, что значения разности работ выхода $\Delta\phi$ для этих катодов отличаются всего примерно на 0,2 эВ. Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с

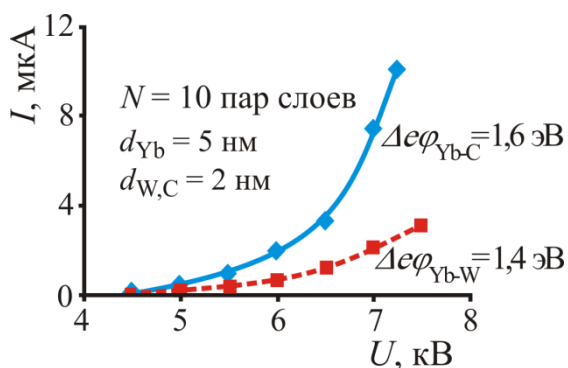


Рис. 8 Экспериментально измеренные ВАХ многослойных Yb-C и Yb-W катодов с, $\Delta\phi_{Yb-W} \sim 1,4$ эВ, $\Delta\phi_{Yb-C} \sim 1,6$ эВ, $d_{Yb} = 5$ нм, $d_{W,C} = 2$ нм, $N = 10$ пар слоев

результатами расчетов, поскольку расчетная разница составляет 3,6 раза. Таким образом, полученные экспериментальные данные подтверждают результаты расчетов и свидетельствуют о возможности увеличивать отбираемый с многослойных катодов ток эмиссии, выбирая материалы с большей разницей работ выхода.

Возможности более существенного увеличения токов эмиссии при обеспечении большей разности работ выхода $\Delta\phi$ приведенных в контакт материалов в многослойной структуре были продемонстрированы при исследовании Hf-Pt катодов.

Сравнивались эмиссионные характеристики оптимизированных Yb-C и Hf-Pt катодов на подложках из арсенида галлия. Yb-C и Hf-Pt катоды имели одинаковую ширину 2 мм. Yb-C катод, включающий 40 пар слоев иттербия и углерода толщиной соответственно $d_{Yb} = 10$ нм и $d_C = 2$ нм, обеспечивал токи эмиссии немногим более 120 мкА при плотности тока ~ 13 А/см² и $U \approx 8$ кВ. Hf-Pt катод, включающий в два раза меньшее количество пар слоев ($N=20$) со слоями гафния и платины толщиной соответственно 10 и 2 нм, позволял получать почти в десять раз большие токи эмиссии (свыше 1 мА) и плотности тока около 250 А/см² при меньшем напряжении $U \approx 6$ кВ. Таким образом, результаты исследования многослойных катодов на подложках из арсенида галлия свидетельствуют о преимуществах Hf-Pt катодов.

В некоторых случаях использование полевых эмиттеров на толстой (430 мкм) подложке из монокристалла затруднено. Так, для формирования электронных потоков в миниатюрных приборах, в особенности, потоков кольцевого сечения или любых криволинейных в сечении потоков, более подходят полевые эмиттеры, сформированные на гибких подложках из тонкой металлической фольги. В работе была исследована работа наиболее перспективных для получения больших токов многослойных Hf-Pt катодов, сформированных на подложках из алюминиевой и танталовой фольги. Были определены эмиссионные характеристики плоских и кольцевых в сечении катодов такого типа.

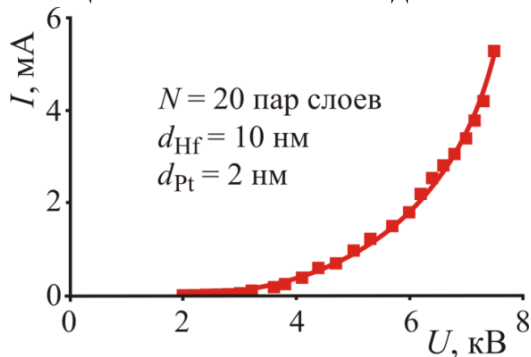


Рис. 9 ВАХ многослойного Hf-Pt плоского катода длиной 5 мм на подложке из Al.

С плоского Hf-Pt катода длиной 5 мм ($N = 20$ пар слоев, $d_{Hf} = 10$ нм, $d_{Pt} = 2$ нм) на Al подложке удалось получить ток эмиссии более 5,5 мА при плотности тока до ~ 450 А/см² (рис.9). Такой же по структуре Hf-Pt катод ($d_{Hf} = 10$ нм, $d_{Pt} = 2$ нм, $N = 20$ пар слоев) кольцевого сечения диаметром 14 мм на Al подложке обеспечивал токи эмиссии более 30 мА, при плотности тока до ~ 300 А/см² (рис.10). Отбор больших токов с катодов на алюминиевой подложке был затруднен из-за деформации подложки, происходящей при ее

нагреве отбираемыми токами. Большие токи (около 40 мА) были получены с кольцевого Hf-Pt катода с такой же по структуре многослойной системой на более

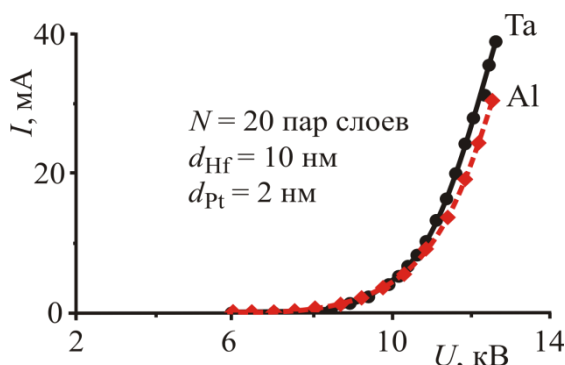


Рис. 10 ВАХ многослойных Hf-Pt катодов кольцевого сечения диаметром 14 мм, на подложках из Al и Ta.

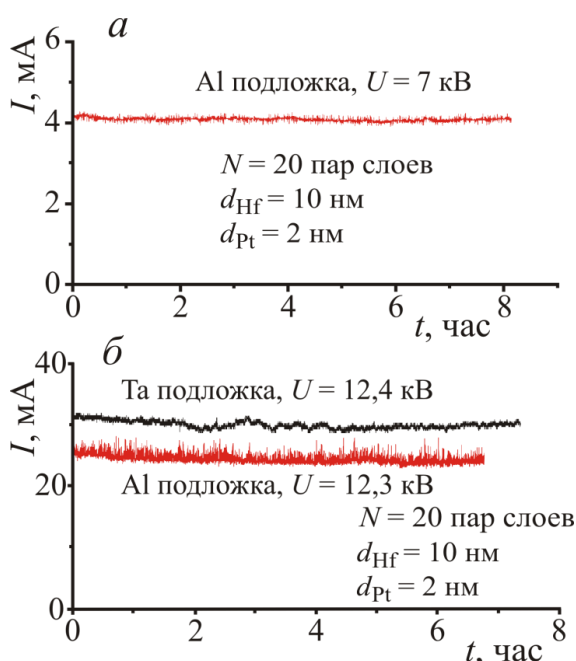


Рис. 11. Временная зависимость тока эмиссии I плоских (а) и кольцевых в сечении (б) многослойных Hf-Pt катодов на Al и Ta подложках.

тугоплавкой и жесткой подложке из тантала (рис.10). При этом, экспериментально измеренные токи эмиссии с чистых Al и Ta подложек были более чем на два порядка меньше токов эмиссии многослойных катодов.

Из полученных данных следует, что многослойные Hf-Pt катоды могут обеспечивать токи полевой эмиссии в несколько десятков мА при плотностях тока ориентировочно до $300-450 \text{ А/см}^2$, достаточные для обеспечения работы некоторых типов миниатюрных, но высоковольтных приборов.

Для решения вопросов, связанных с практическим использованием полевых эмиттеров, важна информация о возможностях длительной их эксплуатации при отборе больших токов в условиях технического вакуума. Для получения такой информации регистрировались изменения токов эмиссии всех разработанных многослойных эмиттеров во время их работы (рис.11). Такие измерения повторялись многократно в разные дни. Суммарное время, в течение которого с плоских и кольцевых катодов, как на Al так и на Ta подложках отбирался ток эмиссии превышало 40 - 70 часов. Полученные данные свидетельствуют, что все Hf-Pt катоды, сформированные на подложках из GaAs, Al и Ta, достаточно стабильно функционируют, во всяком случае, в течение нескольких десятков часов при отборе токов в единицы - десятки мА в

условиях технического вакуума $10^{-7} - 10^{-8}$ Торр.

В **заключении** отражены основные результаты работы:

- 1 Доказана возможность получения интенсивной полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода $e\phi$ под действием полей контактной разности потенциалов.
- 2 Разработаны технологии создания многослойных наноструктурированных катодов на основе контакта материалов с разной работой выхода и изготовлены опытные образцы эмиттеров с использованием пар материалов In- C_{60} , Yb-C, Yb-W, Hf-Pt на подложках из монокристалла арсенида галлия (толщиной 430 мкм) и тонких фольг (толщиной 9-10 мкм) из вольфрама, алюминия и тантала.
- 3 Разработаны методы экспериментального исследования полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода.

- 4 Разработаны электронно-оптические системы с полевыми эмиттерами, построенными на основе контакта материалов с разной работой выхода, для формирования плоских и кольцевых в сечении электронных потоков для миниатюрных, но высоковольтных электронно-пучковых приборов.
- 5 Разработаны методы расчета характеристик многослойных полевых эмиттеров, построенных на основе контакта материалов с разной работой выхода.
- 6 В расчетах и экспериментально определены оптимальные параметры многослойных эмиттеров:
 - оптимальные толщины слоев многослойных катодов с большей работой выхода составляют примерно 2 нм;
 - оптимальная толщина слоев с меньшей работой выхода зависит как от разницы работ выхода пары материалов катода, так и от суммарной толщины слоистой структуры и, например, при суммарной толщине 400 нм имеет величину 10-20 нм.
- 7 Определены в расчетах и экспериментах закономерности эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода. Полученные данные свидетельствуют:
 - исследованные многослойные катоды, включающие до 40 пар нанослоев материалов с разной работой выхода и имеющие суммарную толщину структуры не более 300-400 нм, обеспечивают стабильную полевую эмиссию в высоковольтных электронных приборах, работающих в условиях технического вакуума;
 - оптимизированные гафний - платиновые многослойные катоды позволяют получать токи эмиссии в несколько десятков миллиампер при плотности тока до 300-450 А/см².
- 8 Построена модель полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода, из которой следует:
 - токи полевой эмиссии многослойных катодов определяются потоками электронов из переходных областей между слоями с малой и большой работой выхода;
 - рост тока эмиссии катода при увеличении анодного напряжения происходит не только из-за увеличения суммарного поля у поверхности катода, но и вследствие увеличения площади эмитирующей поверхности катода;
 - токи полевой эмиссии многослойных катодов увеличиваются с ростом количества N пар слоев с разной работой выхода при $1 < N \leq 40$, с увеличением разности работ выхода $\Delta\phi$ примыкающих друг к другу слоев, с уменьшением толщины слоев с большей работой выхода, с увеличением толщины слоев с меньшей работой выхода.

Публикации по теме диссертации

- A1 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Д.А. Саксеев, Т.А. Тумарева. Влияние полей пятен на полевую эмиссию композитов // ЖТФ, 2011, Т.81, №6, С. 104-108.
- A2 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, И.А. Светлов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев. Разработка в СПбГПУ полевых эмиттеров для электронных устройств, работающих в техническом вакууме // Известия вузов, ПНД, 2012, Т. 20, № 3, С. 94-107.
- A3 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев. Полевая эмиссия из контакта материалов с разной работой выхода // Тезисы докладов Всероссийской молодежной конференции «Актуальные проблемы нано- и микроэлектроники» (25-28 сентября 2012 г., Уфа), Изд. РицБашГУ, С. 14.

- A4 G.G. Sominski, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva, E.I. Givargizov, and A.N. Stepanova. Cold Field Emitters for Electron Devices Operating in Technical Vacuum // Proc. of Int. Conf. IRMMW-13 (September 01-06, 2013, Mainz on the Rhine, Germany), P.1-29.
- A5 G.G. Sominski, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva, E.I. Givargizov, and A.N. Stepanova. Cold field emitters for electron devices operating in technical vacuum // St.-Pet. State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 2013, №4-2(182), P.136-141.
- A6 V.E. Sezonov, G.G. Sominski, Yu.M. Zadiranov. Multilayer field emitters of new type // Proc. of 10th Int. Vacuum Electron Sources Conf. and 2nd Int. Conf. on Emission Electronics (June 30 – July 4, 2014, St. Petersburg, Russia), P.228-229.
- A7 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева, Ю.М. Задиранов, С.Ю. Корнишин, А.Н. Степанова. Полевые эмиттеры нового типа для высоковольтных электронных устройств // Известия вузов, Радиофизика, 2015, Т. 58. № 7. С. 567-576.
- A8 G.G. Sominski, V.E. Sezonov, Yu.M. Zadiranov. Field emitter prepared from the contacted ytterbium and carbon nanolayers // In Book of Abstracts of 13th International Conference Advanced Carbon NanoStructures (June 29 - July 03, 2015. St. Petersburg, Russia), P. 155.
- A9 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Ю.М. Задиранов. Полевые эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нано-слоев иттербия и углерода // НТБ СПбГПУ, Физико-математические науки, 2015, № 3(225), С. 48-52.
- A10 Vyacheslav Sezonov, Gennadi Sominski. Multilayer nano-structured field emitters for formation of high density electron beams in miniaturized devices // Proc. of 14th Baltic Conf. on Atomic Layer Deposition, (October 2 -4 2016, St. Petersburg, Russia), P.63-65.
- A11 Gennadii Sominskii, Vyacheslav Sezonov, Sergey Vdovichev. Nano-structured multi-layer emitters-a new and promising source of high density electron flows for miniature electronic devices // 18th Int. Vacuum Electronics Conf., IVEC, (April 24-26, 2017, London, UK), 17545618, P. 1–2.
- A12 G.G. Sominskii, V.E. Sezonov, E.P. Taradaev, T.A. Tumareva. Prospective field emitters for miniature high voltage electronic devices operating at technical vacuum conditions // International Workshop 2017 "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", EPJ Web of Conferences, 2017, 04028, P. 149.
- A13 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев. Разработка и исследование в СПбПУ полевых эмиттеров для коротковолновых СВЧ приборов. Последние достижения // Известия вузов, ПНД, 2018, Т. 26, № 3, С. 109-126.
- A14 Gennadii Sominskii, Vyacheslav Sezonov, Tatiana Tumareva, Evgenii Taradaev. Perspective Field Emitters For Electron-Beam Microwave Devices Of Short-Wave Millimeter And Submillimeter Range // Proc. IRMMW-THz (September 9-14, 2018, Japan), 8510426, P.1-2.
- A15 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, С.П. Тарадаев, С.Н. Вдовичев. Многослойные полевые эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нано-слоев гафния и платины // ЖТФ, 2019, Т. 89, №1, С.142-146.
- A16 G.G. Sominskii, V.E. Sezonov, S.P.Taradaev. Formation of high-density electron flows by electron-optical systems with multilayer field emitters // Proc. of Int. Conf. IRMMW-19, Paris, France, 2019, 8874156, P.1-2.
- A17 Г.Г.Соминский, В.Е. Сезонов, Е.П. Тарадаев, Т.А. Тумарева, С.П. Тарадаев, А.А. Рукавицына, М.Е. Гиваргизов, А.Н. Степанова. Полевые эмиттеры для высоковольтных миниатюрных электронных устройств, работающих в техническом вакууме // Известия вузов, Радиофизика, 2019. Т.62, №7-8, С. 603-612.
- A18 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов. Многослойные полевые эмиттеры на тонкой металлической подложке // Известия вузов, ПНД, 2020, Т.28, №5, С.505-512.
- A19 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев. // Патент на полезную модель №118119 «Полевой эмиттер» / Заявка от 06.02.2012. Приоритетная справка №2012105851 от 17.02.2012. Опубликовано 10.07.2012.

- A20 Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов // Патент на полезную модель №201222 "Полевой эмиттер из приведенных в контакт материалов с разной работой выхода" / Заявка от 20.06.2020. Зарегистрировано в Гос. реестре полезных моделей РФ 03.12.2020.

Список цитируемой литературы

- [1] В.С. Фоменко. Эмиссионные свойства материалов. Справочник, Киев: Изд. Наукова думка, 1981, 339 с.
- [2] Т.А. Тумарева, Г.Г. Соминский. Работа полевых эмиттеров с активированными фуллереновыми покрытиями в техническом вакууме // ЖТФ, 2013, Т.83, №7. С.121-124.
- [3] N.S. Xu, S. Ejaz Huq. Novel cold cathode materials and applications // Materials Science and Engineering R: Reports, 2005, V. 48, No 2-5, P. 47-189.
- [4] А.В. Елецкий. Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок // УФН, 2010. Т.180, №. 9, С. 897-930.
- [5] J.-M. Bonard, M. Croci, C. Klinke, R. Kurt, O. Noury, N. Weiss. Carbon nanotube films as electron field emitters // Carbon, 2002, V. 40, № 10, P. 1715-1728.
- [6] Y. Huang, W. Wang, J. She, Z. Li. Correlation between carbon–oxygen atomic ratio and field emission performance of few-layer reduced graphite oxide// Carbon. 2012.V.50. P.2657–2665.
- [7] S. Wu, S. Pei, W. Ren, D. Tang, L. Gao, B. Liu. Cheng Field emission of single-layer graphene films prepared by electrophoretic deposition // Adv. Mater. 2009. V.21, №17, P.1756–1760.
- [8] S. Pandey, P. Rai, S. Patole, F. Gunes, G.-D. Kwon, J.-B. Yoo, P. Nikolaev, S. Arepalli. Improved electron field emission from morphologically disordered monolayer grapheme // Appl. Phys. Lett, 2012, V.100, № 4, P.043104.
- [9] U.A. Palnitkar, R.V. Kashid, M.A. More, D.S. Joag, L.S. Panchakarla, C.N.R. Rao. Remarkably low turn-on field emission in undoped, nitrogen-doped, and boron-doped graphene // Appl. Phys. Lett, 2010, V. 97, № 6. P. 063102.
- [10] Л.М. Баскин, Г.Н. Фурсей, В.И. Иванов-Омский и др. // Сборник тезисов Международной конференции по физике диэлектриков, Санкт-Петербург, 1997.
- [11] А.В. Архипов, М.В. Мишин, Г.Г. Соминский. Гистерезис импульсных характеристик автоэлектронной эмиссии с нанотрубок пленок // ЖТФ, 2005, Т.75, №10, С.104-110.
- [12] Arkhipov A.V., Mishin M.V. Interpretation of dynamic and dc field-emission characteristics of nanocarbons in terms of two-stage emission model // Special issue of the journal “Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures”, 2010, V.19 №1-2, P.75-80.
- [13] Arkhipov A.V., Gabdullin P.G., Mishin M.V. On possible structure of field-induced electron emission centers of nano-porous carbon // Special issue of the journal “Fullerene, Nanotubes, and Carbon Nanostructures”, 2010, V.19, №1-2, P.86-91.
- [14] И.А. Журавель, Е.А. Бугаев, А.Ю. Девизенко, Ю.П. Першин, В.В. Кондратенко. Исследование структуры межслоевых границ раздела в многослойных периодических композициях Cr/Sc и Co/C методом рентгеновского диффузного рассеяния // Физическая инженерия поверхности, 2011, .Т. 9, № 2,. С. 134-141.
- [15] И.А. Журавель, Е.А. Бугаев, Л.Е. Конотопский, В.А. Севрюкова, Е.Н. Зубарев, В.В. Кондратенко. Структурно-фазовые превращения в многослойной пленочной системе C/Si при отжиге // ЖТФ, 2014, Т. 84, № 5, С. 71-77.
- [16] Е. А. Вишняков. Новые элементы многослойной оптики мягкого рентгеновского диапазона и их применение в спектроскопии // Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт 2013, 132 с.
- [17] Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, С.П. Тарадаев, С.Н. Вдовичев. Многослойные полевые эмиттеры, изготовленные из приведенных в контакт нанослоев гафния и платины // ЖТФ, 2019, Т. 89, № 1, С.142-146.