

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

На правах рукописи

Попов Евгений Олегович

Методика и результаты исследования
многоострийных полевых эмиттеров большой площади

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в циклотронной лаборатории Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный консультант:

Кузнецов Виктор Иосифович, д.ф.-м.н., с.н.с., зам. руководителя Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты:

Фурсей Георгий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, Почётный профессор СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, вице-президент РАЕН (Российской Академии Естественных Наук), Председатель Санкт-Петербургского отделения РАЕН, Заслуженный деятель науки РФ

Шешин Евгений Павлович, д.ф.-м.н., профессор кафедры вакуумной электроники ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», г. Москва

Егоров Николай Васильевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой моделирования электромеханических и компьютерных систем ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится « » 20 года в часов на заседании диссертационного совета ФТИ 34.01.03 созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу: 194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Большая аудитория Гл. здания.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ <http://www.ioffe.ru>

Автореферат разослан « » 20 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Теплова Наталья Витальевна, научный сотрудник, к.ф.-м.н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования полевых эмиссионных источников электронов определяется критически важными вопросами национальной безопасности, проблемами импортозамещения и сохранения приоритетов в области разработки и создания новых изделий вакуумной наноэлектроники, устойчивых к работе в условиях высоких температур и космической радиации.

Полевые эмиттеры разрабатываются для таких областей применения, как полевые эмиссионные дисплеи (FED), рентгеновские источники (3D томографы, микрофокусные трубки для рентгеновской литографии), космические двигатели для межорбитальных перелётов, компактные масс-спектрометры и датчики газов, преобразователи энергии, СВЧ техника, террагерцовые генераторы и детекторы, широкополосная радиолокация, а также для создания новой элементной базы вакуумной наноэлектроники, устойчивой к рентгеновскому излучению и тепловому воздействию [1]-[3].

Большие токи полевой электронной эмиссии можно получить только при использовании многоострийных полевых эмиттеров, или, как их называют в международном сообществе, эмиттеров большой площади (LAFE – large area field emitter).

Однако прогрессу в практическом применении LAFE мешают две проблемы, которые связаны с *методологическими подходами* к их исследованию. Первая связана с общими вопросами теории полевой эмиссии, в том числе – применимости базовых формул к описанию многоострийных эмиттеров. Вторая проблема обусловлена сложностями экспериментальных подходов к регистрации вольт-амперных характеристик LAFE (ВАХ) и алгоритмов их обработки с целью определения ключевых характеристик, таких как коэффициент усиления поля и площадь эмиссии. Многоострийные эмиттеры демонстрируют около десятка различных параметров, которые следует учитывать и анализировать, поэтому экспериментальные методики исследования LAFE все ещё находятся в стадии становления [4]-[13].

Примером осознания важности комплексного подхода к исследованию и обработке полевых эмиссионных данных, являются материалы доклада, предоставленного на ведущей конференции по вакуумной наноэлектронике IVNC'2016 [4], где большим коллективом авторов были предложены два принципа исследования LAFE: Базовый и Полный. Однако, большая часть задач, поставленных в работе [4] и более подробно раскрытых в [5], уже была реализована на практике в «методике записи и онлайн обработки вольт-амперных характеристик полевых эмиттеров», разработанной в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе нашей научной группой.

Принципы онлайн обработки ВАХ разрабатывались нами начиная с 1999 г. [1a]-[4a]. Одновременная регистрация ВАХ и масс-спектрометрических данных о процессах, сопровождающих полевую эмиссию, была предложена нами в 2007 [5a], и развита в работах [7a]-[9a]. Расширение возможности онлайн обработки ВАХ с применением данных эмиссионного проектора было представлено в работах [9a]-[12a], начиная с 2015 г. [12a].

Наиболее близкими аналогами нашей методики являются комплексы оборудования и программного обеспечения, разработка которых ведётся двумя коллективами авторов [6]-[8] (Бразилия) и [4][9][10] (США) с 2016 года (при поддержке военных ведомств). К настоящему времени появилось ещё несколько работ, развивающих комплексный подход к исследованию LAFE. Так в работе [11] (КНР) описан метод точного измерения межэлектродного расстояния. Авторы [12] (Финляндия) предоставили компьютерный код для продвинутой методики обработки ВАХ с учётом температуры и излучения эмиттера. В работе [13] (США) были представлены тепловизионные результаты исследований углеродных эмиттеров.

По существу же, до настоящего времени нет ни одной полноценной методики для исследования LAFE ни в нашей стране, ни за рубежом. Полноценная методика должна обладать возможностью внедрения и проверки разрабатываемых теоретиками моделей, описывающих поведение LAFE, а также проведения не только качественных, но и количественных сравнений эмиттеров, изготовленных по той или иной технологии.

Наша научная группа многие годы занимается развитием и совершенствованием многофакторной методики исследования LAFE для построения физико-математических моделей, описывающих функционирование реальных эмиттеров при различных условиях их эксплуатации. Встраивание и проверка теоретических моделей осуществляется за счёт модульного принципа управляющей программы и онлайн обработки данных. Более того, методика позволяет исследовать не только LAFE, но и одноострийные и точечные источники, а также проводить термополевые исследования.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы являлось создание новой методики исследования полевых эмиттеров большой площади для построения физико-математических моделей, описывающих их многопараметрическое функционирование при различных условиях эксплуатации, а также создание аппаратно-программного научно-исследовательского комплекса для фундаментальных экспериментальных исследований и технологической оптимизации изготовления полевых эмиттеров.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- разработка новой экспериментальной методики, способной обрабатывать большие объёмы данных об эмиссионных характеристиках и явлениях, сопутствующих полевой эмиссии непосредственно в ходе эксперимента. Обеспечение экспериментатора недоступными ранее возможностями для анализа и оперативного управления экспериментальными исследованиями.
- создание экспериментальной установки, обеспечивающей многоканальный сбор информации с различных датчиков, синхронизацию данных от быстрых и медленных измерительных устройств, защиту экспериментального оборудования от высоковольтных разрядов.

- внедрение масс-спектрометрической методики для исследования десорбционных процессов, сопровождающих полевою эмиссию.
- внедрение модульной системы онлайн обработки вольтамперных характеристик с применением различных физико-математических моделей полевой эмиссии.
- визуализация эмиссионного процесса и онлайн обработка картин свечения.
- внедрение теоретических подходов к анализу экспериментальных данных в комплексную методику исследования реальных эмиттеров, включая синтез и подгонку вольтамперных характеристик в режиме онлайн.
- определение микроскопических параметров полевых эмиттеров на основе макроскопических измерений, выявление связи их эволюции с условиями эксплуатации.
- построение феноменологических и численных моделей, описывающих поведение эмиттеров большой площади, включая 3D моделирование эмиссионных структур.
- исследование тонкой структуры и особенностей вольтамперных характеристик в различных режимах высоковольтного питания.

Научная новизна

1. Впервые предложена и реализована аппаратно-программная методика многоканального сбора данных об эмиссионных характеристиках LAFE одновременно с онлайн обработкой токовых и визуальных эмиссионных характеристик, а также параметров условий функционирования эмиттеров, с помощью различных физико-математических моделей полевой эмиссии.
2. Обнаружены и исследованы различные формы гистерезиса эмиссионных характеристик в различных режимах питания. На основе одновременной регистрации вольтамперных характеристик и масс-спектрометрических данных предложена модель, объясняющая наблюдаемые виды гистерезиса (прямой, обратный, в виде восьмёрки), а также механизмы перехода из одного типа гистерезиса в другой. Предложена феноменологическая адсорбционно-десорбционная модель гистерезиса, расчёты по которой подтверждают правильность предложенной модели.
3. Получены новые данные о статистике распределения эмиссионных структур на основе онлайн обработки ВАХ путём построения облаков данных в координатах наклон-отсечка.
4. С применением масс-спектрометрического комплекса были получены новые данные о механизме формирования эмиссионных структур при случайных вакуумных пробоях в ходе тренировки, а также при длительном режиме работы LAFE.
5. Впервые были экспериментально исследованы различные виды многоострижных и одноострижных эмиттеров с использованием критерия на соответствие режиму полевой эмиссии Р. Форбса.

6. Впервые была построена фазовая диаграмма в координатах наклон-отсечка (метод SK-анализа) в онлайн режиме, которая позволила получить новые данные об эволюции таких параметров, как работа выхода и эффективный коэффициент усиления поля.

7. Впервые была внедрена методика экспериментального исследования изменения эффективной площади эмиссии в онлайн режиме с помощью тангенциального метода и с учётом полевой зависимости специальных функций полевой эмиссии.

8. Впервые были получены локальные вольт-амперные характеристики на основе онлайн обработки эмиссионных изображений LAFE (т.н. картин свечения).

9. Была предложена новая запись основного уравнения полевой эмиссии, не содержащая табулированных значений и в единой системе международных единиц.

10. Предложены и использованы модифицированные координаты Фаулера-Нордгейма для обработки ВАХ и анализа соответствия эмиссионному режиму работы многоострийных полевых эмиттеров.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Разработан и реализован метод измерения и онлайн обработки многоострийных полевых эмиттеров большой площади в различных режимах высоковольтного питания, создан аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс для фундаментальных экспериментальных исследований и технологической оптимизации изготовления полевых эмиттеров, который включает в себя одновременную регистрацию и онлайн анализ вольт амперных характеристик, масс-спектрометрических данных и эмиссионных изображений.

2. Исследованы полевые эмиттеры разных типов. Предложен методический подход определения температуры эмиссионных центров нанокompозитных эмиттеров, основанный на масс-спектрометрических измерениях процесса термодеструкции полимерной матрицы.

3. На основании масс-спектрометрических данных и компьютерного моделирования адсорбционно-десорбционных процессов дано объяснение эффекту гистерезиса в вольт-амперных характеристиках эмиттеров различного типа с возможностью прогнозирования переходов из одной формы гистерезиса в другую (прямой, обратный и в форме восьмёрки).

4. Впервые экспериментально применён (в режиме онлайн) тест Р. Форбса на соответствие эмиссии полевому режиму. Показано, что эмиттеры большой площади на основе одностенных и многостенных углеродных нанотрубок соответствуют основной теории Фаулера-Нордгейма.

5. Экспериментально подтверждено теоретическое предсказание о двухкомпонентном распределении коэффициентов усиления поля эмиссионных центров в нанокompозитных эмиттерах большой площади. Разработан метод оценки соотношения коэффициентов усиления поля этих компонент.

6. Разработана методика применения анализа рнаклон-отсечка с градуировочной сеткой (SK-анализ) к экспериментальным вольт-амперным характеристикам в режиме онлайн. Показана характерная эволюция эффективной работы выхода и коэффициента усиления поля нанокompозитных эмиттеров большой площади.
7. Захват эмиссионных изображений одновременно с регистрацией макроскопической вольт-амперной характеристикой позволяет строить вольт-амперные характеристики индивидуальных эмиссионных центров, а также оценивать их параметры: коэффициент усиления поля и площадь эмиссии.
8. Выведен ряд теоретических приближений в основной формуле полевой эмиссии удобных для применения на практике. Детально исследован формализм и подходы экспериментального определения площади полевой эмиссии многоострийных полевых катодов.
9. Разработаны методы обработки вольт-амперных характеристик для определения степени предэкспоненциального множителя напряжения в основной формуле полевой эмиссии.
10. Предложены и использованы для обработки экспериментальных данных модифицированные координаты Фаулера-Нордгейма.

Достоверность и практическая значимость результатов работы

Достоверность экспериментальных данных, полученных в ходе диссертационной работы, определяется комплексным использованием различных экспериментальных методов, многократной повторяемостью и согласованностью результатов для широкого круга полевых эмиттеров. Обоснованность предложенных физических моделей и теоретических подходов подтверждается согласием расчётных данных, 3D моделирования и экспериментальных результатов.

С помощью разработанной установки были исследованы несколько десятков различных типов эмиттеров, относящихся к разным классам и технологиям изготовления (ориентированные и неориентированные, регулярные и стохастические, твердотельные и жидкометаллические, углеродные, металлические и полупроводниковые, многоострийные и одноострийные). Число обрабатываемых за один рабочий день экспериментальных данных составляет порядка ста тысяч ВАХ. Объём статистической информации о свойствах LAFE, реализованный на установке, не имеет аналогов.

Разработанная и реализованная комплексная методика исследования LAFE является критически важной для развития отечественной науки в области вакуумной наноэлектроники. В качестве наиболее близких прототипов можно указать установки, находящиеся в Университете Сан-Пауло (Бразилия) [8], в США на базе ВВС Райт-Паттерсон [4] и в Мичиганском государственном университете [10].

Практическая значимость работы заключается в применении разработанного комплекса для технологической оптимизации перспективных эмиттеров. Проведено исследование нескольких партий технологических LAFE на основании договорных и инициативных научно-технических работ.

Основным практическим результатом работы является созданный аппаратно-программный научно-исследовательский комплекс в совокупности с разработанными методиками для изучения свойств LAFE, которые учитывают явления, сопровождающие полевою эмиссию.

Апробация работы

Результаты работы были представлены на ведущих международных конференциях по полевой эмиссии (в первую очередь на проводимой ежегодно международной конференции по вакуумной наноэлектронике IVNC), а также нескольких всероссийских и региональных конференциях. В ряде случаев на международных конференциях это были единственные устные доклады из России. На недавней конференции IVNC&IVESC'2019, Цинцинати, США, был сделан приглашённый доклад по совместной работе (докладчик Р. Форбс, ведущий теоретик в области полевой эмиссии, Университет Суррея, Гилфорд, Великобритания).

По результатам работы были сделаны доклады на следующих конференциях (сокращённый список):

1. 12th International Vacuum Microelectronics Conference, IVMC'99, 6-9 July 1999, Darmstadt, Germany.
2. 46th International Field Emission Symposium, IFES 2000, July 23-28, 2000, University of Pittsburgh, Pittsburgh, USA.
3. Particle Accelerator Conference, Chicago, USA, June 18-22, 2001.
4. 47th IFES2001, Berlin, Germany, July 29 - August 3, 2001.
5. 22nd International Display Research Conference (Eurodisplay 2002), Nice, France, October 1-4, 2002.
6. III Workshop, Thermochemical processes in plasma aerodynamics, St.Petersburg, НС "Leninets", July 28-31, 2003.
7. 16th International Vacuum Congress, IVC-16/ICSS-12/NANO-8/AIV-17, June 28 - July 2, 2004, Italy, Venice.
8. 9th European Particle Accelerator Conference, EPAC2004, July 5-9, 2004, Switzerland, Lucerne.
9. 49th International Field Emission Symposium, IFES'2004, July 12-15, 2004, Austria, Graz.
10. 19th International Vacuum Nanoelectronics & 50th International Field Emission Symposium, IVMC&IFES 2006, July 17-20, Guilin, China.
11. 20th IVMC 2007, July 8-12, 2007, Chicago, USA.
12. 51st International Field Emission Symposium, IFES'08, Rouen, France, June 29-July 4, 2008.
13. 22nd International Vacuum Nanoelectronics Conference, IVNC2009, July 20-24, 2009, Hamamatsu, Japan.
14. 52nd International Field Emission Symposium, IFES2010, Sydney, Australia, 5-8 July 2010.

15. Российско-украинский семинар “Композиционные системы полимер-наноуглерод и различные физико-химические подходы к их исследованию”, Институт проблем машиноведения, Санкт-Петербург, 25-27 мая 2011 г.
16. 25th IVNC2012, July 9-13, 2012, Jeju Island, Korea.
17. 19th International Vacuum Congress, Paris, France, September 9-13, 2013.
18. 27th IVNC, 6-10 July, 2014, Engelberg, Switzerland.
19. International Vacuum Electron Sources Conference - International Conference on Emission Electronics, IVESC-ICEE-2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30-July 04, 2014.
20. 28th IVNC, 13-17 July, 2015 Guangzhou, China.
21. I Международная научно-практическая конференция "Графен и родственные структуры: синтез, производство и применение", Тамбов, 11-13 ноября 2015 г.
22. II Российско-белорусская научно-техническая конференция «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» им. О. В. Лосева, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 17-19 ноября 2015 г.
23. 29th IVNC, 11-15 July 2016, Vancouver, Canada.
24. 1st International Conference on Advanced Energy Materials and 8th International Conference on Advanced Nanomaterials, AEM2016, University of Surrey, 12-14 Sept., 2016, Guildford, UK.
25. 30th IVNC, 10-14 July 2017, Regensburg, Germany.
26. 31th IVNC, 9-13 July 2018, Kyoto, Japan.
27. 32sd IVNC and 12th IVESC'2019, 22-26 July, 2019, Cincinnati, USA.
28. 5th International Conference on Advanced Energy Materials, University of Surrey, 11-13 September, 2019, Guildford, UK
29. PowerMEMS 2019, 2-6 December, 2019, Krakow, Poland.
30. 33rd IVNC 2020 – virtual format. July 6-8, 2020, Lyon, France.

Исследования проводились при финансовой поддержке нескольких грантов и программ. Работа по исследованию микроструктуры и эмиссионных свойств многоострийного жидкометаллического эмиттера проводилась при поддержке грантов РФФИ №98-02-18414-а и CRDF RUP1-1447-ST-04 (2004). Исследования транспортных свойств ряда полимерных плёнок проводились в рамках проекта РФФИ №00-03-33060-а (2000-2002). Масс-спектрометрические исследования процессов деградации нанокompозитных эмиттеров проходили при поддержке Программы фундаментальных исследований ОФН РАН ОФН-5 4.16 «Новые материалы и структуры» РАН (2007-2008), Программы ОФН «Физика новых материалов и структур» (2009-2012). Работа по исследованию сорбционных свойств многостенных углеродных нанотрубок, фуллеренов и композитов на их основе велась при поддержке РФФИ 09-08-90410-Укр_ф_а (2009-2010) и 10-08-90000-Бел_а (2010-2011). Автоэмиссионные исследования нанокompозитных материалов проходили при поддержке РФФИ №12-08-31406-мол_а «Разработка методики изучения и сертификации автоэмиссионных катодов, созданных на основе углеродных нанокompозитных материалов» (2012-2013), и частичной

поддержки Программы ОФН «Физика новых материалов и структур» В19 (2013-2014) «Изучение особенностей молекулярных механизмов взаимодействия на границе раздела "наночастица-макромолекула" с целью разработки фундаментальных основ создания новых полимерных наноконпозиций для работы в различных внешних полях (электрических, тепловых, механических)», а также при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в НТ сфере №0002235 (2014-2015), «Совершенствование методики исследования автоэмиссионных свойств наноструктурированных материалов». При поддержке грантов РФФИ 06-02-26940-з, 07-02-08352-з, 08-02-08397-з, 09-02-08367-з, 10-02-08299-з были сделаны единственные из России устные доклады в Китае, США, Франции, Японии, Австралия.

Исследования проводились также при частичной поддержке подпрограммы I.31 «Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики» Программы Президиума РАН № 7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники» (2019), ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» НИУ МИЭТ при поддержке Минобрнауки России.

В настоящее время выполнен договор (2019-2020) по исследованию углеродных LAFE в диодном и триодном исполнении, а также проведены исследования по заданию МИЭТ (г. Зеленоград) по изучению массивов из кремниевых острий предназначенных для создания источника рентгеновского излучения с адресуемыми матрицами.

Публикации

Материалы диссертации изложены в **71** публикации, из них **58** индексируемых публикаций в Web of Science.

Личный вклад автора

Автор диссертации внёс определяющий вклад в выбор тематики исследования, постановку задач конкретных работ, их планирование и осуществление. Основная часть приводимых результатов была получена автором лично либо совместно с соавторами публикаций, в большинстве своём – студентами и аспирантами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, а также Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича.

Структура и объём диссертации

Диссертация содержит 310 страниц, основной текст изложен на 253 страницах. В текст работы включены 137 рисунков и 12 таблиц. Диссертация состоит из введения, четырёх основных глав, описания выводов, списка литературы и 14 приложений. Список литературы содержит 370 наименований, а также отдельно выделенный перечень из 71 публикации автора из рекомендованного списка для докторской диссертации, и 30 опубликованных тезисов конференций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются её цели и задачи, изложена новизна и практическая значимость результатов, а также основные научные положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1 (Разработка базовых уравнений для комплексной методики исследования LAFE)** проводится систематизация базовых подходов и ограничений теории полевой эмиссии. Анализируются современные представления о видах барьерной электронной эмиссии. Кратко рассматриваются основные этапы и вектор направления развития теоретических и экспериментальных исследований полевых источников электронов. Проводится ревизия основного уравнения полевой эмиссии, с применением *метода барьера общей формы* (general barrier), предложенного в 2004 [14] и развитого в работах [15],[16]. Ставится целью выведение формул полевой эмиссии так называемого семейства формул Фаулера-Нордгейма (FN-type) в системе международных единиц, чётких по структуре и удобных для использования в разработанной экспериментальной комплексной многоканальной методике записи и обработки ВАХ в режиме реального времени, а также для 3D моделирования эмиссионной способности эмиттеров различной формы. Детально выводятся первая и вторая константы полевой эмиссии с применением фактора Гамова, приводится ясный и корректный вывод константы Зоммерфельда. Особое внимание уделяется введению в практику обработки экспериментальных данных новых специальных математических функций полевой эмиссии. Было показано, что новые аппроксимирующие функции, основанные на понятии безразмерного поля f , имеют значительные преимущества перед традиционно используемым параметром Нордгейма, как для формирования современного вида формул полевой эмиссии, так и для значительного упрощения математических преобразований при проведении аналитических исследований. С учётом понятий *скорости затухания* и *ширины затухания* δ барьера теории барьера общей формы, основное уравнение полевой эмиссии Мерфи-Гуда (MG) в нотации общего барьера принимает вид [11a]:

$$J = z_s \delta^2 D [\pi p / \sin(\pi p)] \quad (1)$$

где $z_s = 4\pi e t / h^3$ – константа Зоммерфельда; D – прозрачность барьера; p – параметр Свенсона-Белла.

Если рассматривать прозрачность барьера на уровне Ферми для барьера типа Шоттки-Нордгейма, то уравнение с учётом введённых функций от работы выхода $\theta(\varphi) = a c_s^{-4} \varphi^3$ и $\eta(\varphi) = b c_s^2 \varphi^{-1/2}$ (a и b – константы Фаулера-Нордгейма), а также барьерных функций ν и τ , будет записываться как [13a]:

$$J = \tau^{-2} \theta f^2 \exp(-\eta \nu / f) \quad (2)$$

где f – безразмерное поле $f = F/F_R$, $F_R = c_s^2 \varphi^2$ – критическое поле снятия барьера, где c_s^2 – константа Шоттки.

Далее, с использованием специальных математических функций полевой эмиссии (Форбса-Дина), аппроксимирующих ν и τ , сформулировано полное инженерное уравнение полевой эмиссии для безразмерного поля f и без табулированных значений, где все константы записаны в системе СИ [39a]:

$$J = a\varphi^{-1}[(1 + f/9 - (f/18)\ln f]^{-2}F^{2-\eta/6}F_R^{\eta/6}\exp(\eta)\exp(-b\varphi^{3/2}/F) \quad (3)$$

В результате, экспериментальная методика была обеспечена различными видами представления основной формулы полевой эмиссии в безразмерном (2), полуразмерном (3) и размерном виде. Как показали исследования, наиболее удачным решением является применение полной формулы с предэкспоненциальной поправкой τ , как в виде функции, зависящей от поля, так и в виде константы $\tau^2 = 1.1$.

На основании анализа научных работ [17][18] можно сделать вывод, что довольно большое количество публикаций по исследованию LAFE, применяющих FN-типе уравнения, содержат численные оценки поля вблизи поверхности эмиттера, величины которых не соответствуют моделям и принципам, лежащим в основе квантовомеханической теории полевой эмиссии. Одним из фундаментальных вопросов является определение границ применимости теории Мерфи-Гуда и классической (в иностранной литературе «ортодоксальной») теории полевой эмиссии для описания LAFE.

В отношении идеализированных эмиссионных систем эти границы строятся в виде фазовых диаграмм поле-температура [19]. Однако рассматриваются только теоретические зависимости локальной плотности тока от поля и температуры без учёта вопросов, связанных с обработкой экспериментальных данных. Мы последовательно разобрали три основных ограничения теории Мерфи-Гуда с точки зрения применения их в анализе эксперимента. Первое ограничение – поле снятия барьера Шоттки-Нордгейма. Второе ограничение – неравенство Мерфи-Гуда. И третье ограничение – практический диапазон полей, зависящий от работы выхода. Представлен вывод формулы плотности тока эмиссии для режима ВТЕ (barrier top emission), когда значительная часть электронов идёт с уровней вблизи вершины или несколько выше барьера. Вывод произведён с использованием обозначений теории барьера общей формы.

В результате было получено соотношение для построения фазовой диаграммы MG [13a]:

$$T < \frac{\varphi - c_S F^{1/2} - c F^{3/4}}{k_B + (\varphi - c_S F^{1/2} - c F^{3/4})k_B / \delta_F^{SN}} \quad (4)$$

$$\text{где } \delta_F^{SN} = qk_B T = (4\pi\epsilon_0)^{1/4} \frac{(eF)^{3/4}}{\pi} \left(\frac{\hbar^4}{m_e^2 e^2} \right)^{1/4} = c F^{3/4} \quad (5)$$

Это неравенство аналогично неравенствам, полученным в других теоретических работах. Отличие заключается не только в подходе к выводу, но и в применении международной системы единиц СИ (для сравнения, в других работах использовались системы единиц Хартри в [19] или Гаусса в [20]), а также в использовании безразмерного поля f вместо параметра Нордгейма u .

Была построена фазовая диаграмма полевой эмиссии для разных работ выхода в зависимости от безразмерного поля f . Проведение полевых экспериментов при комнатной температуре (300 К) ограничивает диапазон допустимых значений поля с верхней границей ~ 0.78 (обозначен на графике как "Диапазон Мерфи-Гуда", Рис.1а). Однако практическая регистрация полевой

эмиссии сталкивается с двумя основными ограничениями: чувствительность аппаратуры (минимальные достоверно регистрируемые эмиссионные токи) и максимально достижимые токи эмиссии (без попадания в режим взрывной эмиссии, который как правило возникает из-за быстрого разогрева вершины острого эмиттера). В качестве предельных значений для одноострийных вольфрамowych эмиттеров ($\varphi = 4.5$ эВ) можно взять данные из работ Дайка [21] и других исследователей [2]. В этих работах была рассчитана площадь эмиссии (по геометрическим параметрам эмиттера) и произведена оценка предельных значений плотности тока: $J_{low} = 25.6$ А/м², $J_{up} = 8.8 \cdot 10^{10}$ А/м². Анализ уравнения FN с этими значениями плотности тока позволил получить практический диапазон допустимых полей $[f_{low} = 0.15, f_{up} = 0.45]$ и предельный диапазон полей $[f_{lb} = 0.10, f_{ub} = 0.75]$ для $\varphi = 4.5$ эВ.

Стандартным методом подбора параметра, были вычислены границы диапазонов $[f_{low}, f_{up}]$ и $[f_{lb}, f_{ub}]$ для других работ выхода (см. диаграмму на Рис.1б). На графике также отложены предельные значения полей, которые следуют из неравенства Мерфи-Гуда (4) для двух выбранных температур 300К и 900К. При малых φ граница f_{ub} противоречит этим предельным теоретическим значениям. При повышенных температурах $T = 900$ К и низких работах выхода значения f_{low} оказываются ниже допустимых теоретических значений полей. Диапазон $[f_{low}, f_{up}]$ для работы выхода 4.6 эВ представлен на диаграмме Рис.1а под названием "Практический диапазон".

Произведён анализ формы модельной ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма (ВАХ-ФН), построенной на основании эмпирических данных для нанокompозитного полевого эмиттера. Показано, что температурные загибы ВАХ-ФН появляются вдали от допустимого диапазона полей.

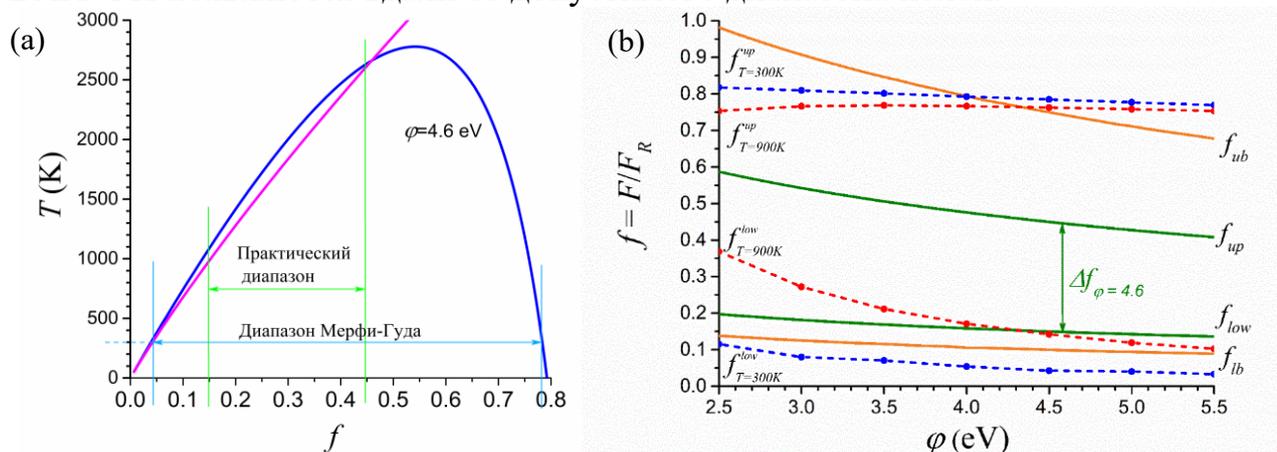


Рис.1. Фазовая диаграмма температура – электрическое поле: (а) диапазоны допустимых значений поля в безразмерном виде для $\varphi = 4.6$ эВ, (б) зависимость границ диапазонов полей $[f_{low}, f_{up}]$ и $[f_{lb}, f_{ub}]$ от величины работы выхода. Пунктиром указаны предельные теоретические значения из диаграммы Мерфи –Гуда, взятые при 300К и 900К

Таким образом, в Главе представлены диапазоны напряжённостей полей, при которых теория Мерфи-Гуда является непротиворечивым описанием полевого эмиттера. За пределами этих границ эмиссия электронов должна обеспечиваться дополнительными условиями: в первую очередь высокой температурой или участием адсорбционных процессов.

Глава 2. (Исследование LAFE). В начале Главы даётся краткая классификация эмиттеров большой площади и сравнение данного понятия с многоострийными эмиттерами. Массивы эмиссионных центров LAFE могут иметь регулярную или нерегулярную (стохастическую) природу. В то же время сами массивы могут быть в форме одиночных, пространственно изолированных, острий и в форме сплошных покрытий. Сплошные покрытия – наиболее сложные в изучении объекты. С другой стороны, структуры, имеющие регулярное строение, являются технологически более ёмкими. Глава раскрывает опыт исследования многоострийных эмиттеров, имеющих стохастическую природу, в том числе, образующих сплошные покрытия.

Существует отдельная задача поиска LAFE, способных длительно и стабильно работать в условиях близких к техническому вакууму [3]. В этом плане интересным представляется развитие жидкометаллических источников электронов (ЖМИ) и ионов [22].

Нами был создан многоострийный ЖМИ новой конструкции, стабильно работающий в режиме простой полевой эмиссии. Эмиттер образован путём протягивания жидкого металла (эвтектики галлия и индия) через поры в ядерной мембране (патент [14a]). Конструкция представлена на Рис.2.

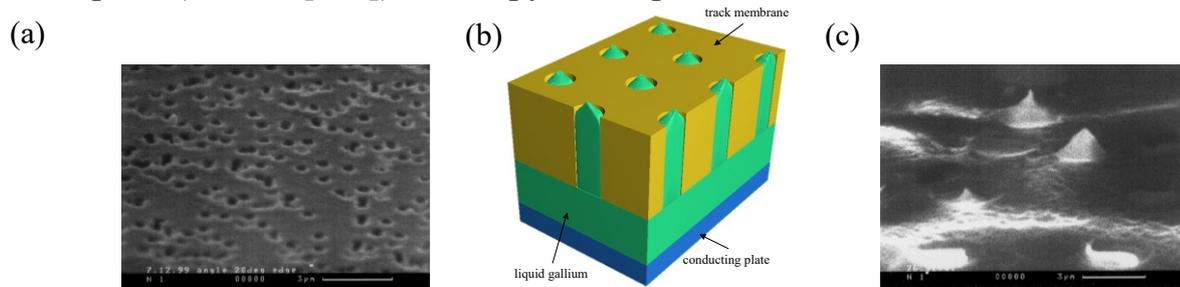


Рис.2. ЖМИ на основе трековой мембраны: (a) SEM полимерной (лавсановой) трековой мембраны, изготовленной на циклотроне ФТИ [1a], (b) конструкция многоострийного ЖМИ, (c) SEM мембраны с каналами, заполненными жидким галлием

Для исследования ЖМИ использовались установки на базе горизонтальных ТМН-500, ТМН-200 и магниторазрядных насосов НОРД150 (Рис.3). Полевая эмиссия исследовалась в диодной конструкции с плоским катодом и анодом, расположенных на расстоянии $d_{sep} = 1 \div 4.1$ мм.

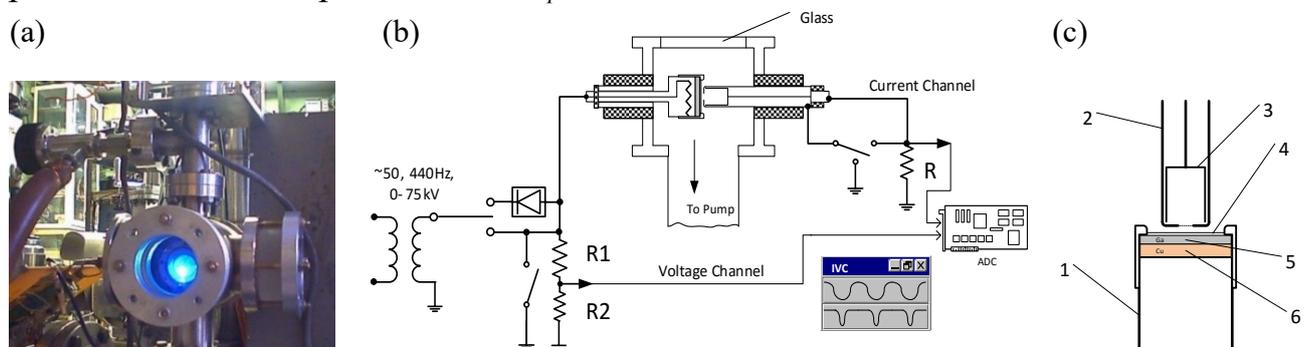


Рис.3. Установка №1 для исследования полевой эмиссии: (a) фотография измерительной камеры, (b) упрощённая схема установки, представленная на конференции PAC'2001 (Чикаго, США) [2a], (c) конструкция катодной и анодной системы для исследования ЖМИ (1 – система крепления образца LAFE; 2 – плоский анод с отверстием; 3 – цилиндр Фарадея; 4 – трековая мембрана; 5 – слой жидкого металла; 6 – проводящая подложка)

В работе [3а] был предложен принцип онлайн обработки ВАХ для получения параметров эмиссионной системы непосредственно в ходе проведения эксперимента. Разработана электронная схема оцифровки временных реализаций сигналов тока и напряжения с возможностью программного опроса аналого-цифрового преобразователя в режиме реального времени. Получаемые данные демонстрировали высокую повторяемость и недоступный ранее статистический объём.

ЖМИ был испытан в различных режимах: от постоянного тока до коротких импульсов наносекундной длительности с частотой повторения несколько кГц. Была получена длительная (несколько часов) полевая эмиссия с токами до 15 мА и макроскопической плотностью тока до 0.1 А/см² в режимах синусоидального (50 и 440 Гц) высоковольтного питания (Рис.3). Стабильность полевой эмиссии оценивалась в пределах 5-15%.

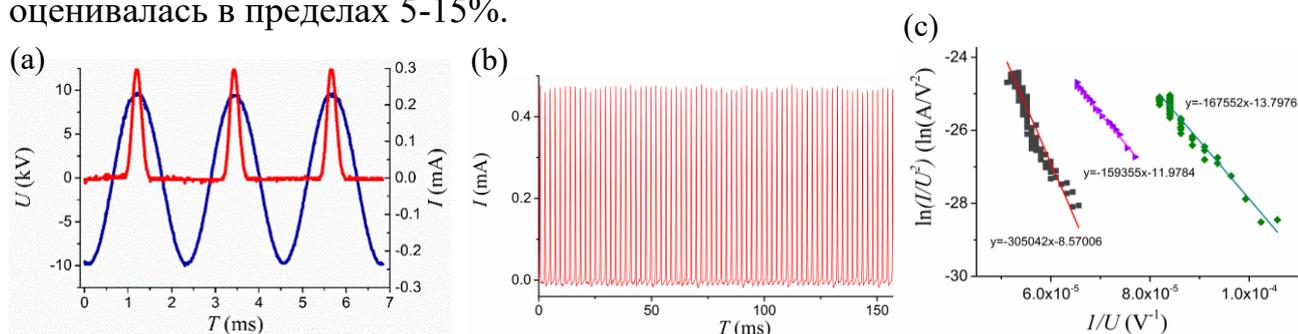


Рис.3. Вольт-амперные характеристики ЖМИ: (а) осциллограммы тока и напряжения, записанные с помощью ADC (400 Гц), (б) временная стабильность эмиссионного тока (каждый пик соответствует импульсу тока), (с) семейство ВАХ-ФН различных образцов (50 Гц)

Была проведена оценка количества эмиссионных центров. Показано, что высокостабильная эмиссия ЖМИ обеспечивается силами поверхностного натяжения, которые не допускают чрезмерное уменьшение радиуса вершины жидкометаллических острий под действием тянущих сил поля [15а][16а]. Для заданного значения равновесного поля F_0 и $\phi_{Ga} = 3.96$ эВ определена плотность тока J , используя формулу Элинсона-Шредника [23] в экспоненциальном виде и в единицах СИ (А/м²):

$$J = 1.4 \cdot 10^{-6} \varphi^{-1} \exp(10.108349/\sqrt{\varphi}) F^2 \exp(-6.493290 \cdot 10^9 \varphi^{3/2}/F) \quad (6)$$

В работе также использовалась модифицированная формула с учётом аппроксимационных функций τ , s и u (см. Главу 1) для значения поля $f = 0.3$, а также с использованием констант полевой эмиссии с большой точностью:

$$J = (1.541433 \cdot 10^{-6}/1.109650) \varphi^{-1} \exp(10.170626/\sqrt{\varphi}) F^2 \cdot \exp(-6.489345 \cdot 10^9 \varphi^{3/2}/F) \quad (7)$$

В результате обработки ВАХ-ФН (Рис.3с) было установлено, что стабильные режимы полевой электронной эмиссии характеризуются радиусами острия 15 ÷ 45 нм и J не более 10⁶ А/см², причём при довольно умеренных полных токах полевой эмиссии от 100 мкА до нескольких мА. Было показано, что число работающих центров может составлять от 100 до 10⁴. Оценка уровня тока из геометрических соображений для ЖМИ достаточно хорошо совпадает с экспериментальными значениями. Стабильная эмиссия без «взрывов» происходила при токах ниже 15 мА.

Исследован комбинированный тип эмиссии, возникающий при питании синусоидальным напряжением с частотой 50 Гц, включающим в себя как автоэмиссию, так и взрывную эмиссию [15a][17a].

Излучающая поверхность эмиттера была ограничена посредством наложения танталовой фольги с отверстиями разной формы. На Рис.4 представлен опыт с прямоугольным отверстием. Как показывают наблюдения в оптический микроскоп, под действием поля произошло протягивание жидкого металла через мембрану с образованием множества эмиссионных центров.

Многочисленные эксперименты с галлиевыми эмиттерами с различными диаметрами пор в ядерной мембране (варианты 0.15, 0.3, 0.4, 0.8, 1, 1.5, 3, 4 мкм) и различной плотностью пор ($6 \cdot 10^7$, $5 \cdot 10^6$), а также анализ SEM фотографий, привели к уточнению модели галлиевого эмиттера. Как показывают данные SEM, при длительной работе катода металл выступает на поверхности в виде микроскопических шариков. Видно, что количество шариков (эмиттеров) близко к плотности отверстий в ядерной мембране. Радиусы составляют < 100 нм, самые крупные не превышают ~ 10 мкм. Для изучения эффекта взаимной экранировки было проведено моделирование полей наблюдаемых структур в ANSYS 9.

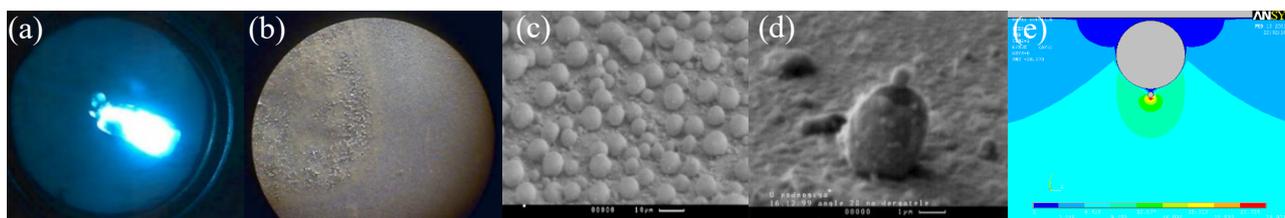


Рис.4. Исследование эмиссионной поверхности ЖМИ: (а) прямоугольная область, ограниченная с использованием фольги, (б) вид поверхности после работы эмиттера (оптический микроскоп), (с) шарики на поверхности от 100 нм до 10 мкм, (д) микровыступ из двух шариков, (е) пример моделирования поля для структуры: шарик $\varnothing 0.5$ мкм расположен на другом, $\varnothing 5$ мкм

Был разработан метод создания многоострийного жидкометаллического эмиттера из нанопористого кристалла GaP. В ФТИ им. А.Ф. Иоффе существует методика создания пористой поверхности кристалла GaP(111) с диаметром нанопор ~ 10 нм, толщиной стенок между ними того же порядка и глубиной ~ 10 мкм [18a]. Известно, что в общем случае полевая эмиссия из широкозонных полупроводников не наблюдается, однако формируемые нанопоры обладают повышенной проводимостью, что позволяет использовать эти каналы в качестве отдельных эмиссионных центров.

Подача высоких напряжений (~ 5 кВ) на образец пористого GaP привела к серии вакуумных разрядов и последующей стабилизации уровня эмиссионного тока (Рис.5). Изображения SEM поверхности образца в разных масштабах и на разных стадиях процесса, а также масс-спектрометрические данные показали, что рабочими элементами полученного эмиттера являются дискретные кластеры галлия, образовавшиеся на поверхности кристалла в результате диссоциации GaP в процессе взрывной эмиссии. Мы полагаем, что необходимые для возникновения взрывной эмиссии туннельные токи протекают именно по стенкам нанопор и обусловлены эффектом Пула-Френкеля [19a].

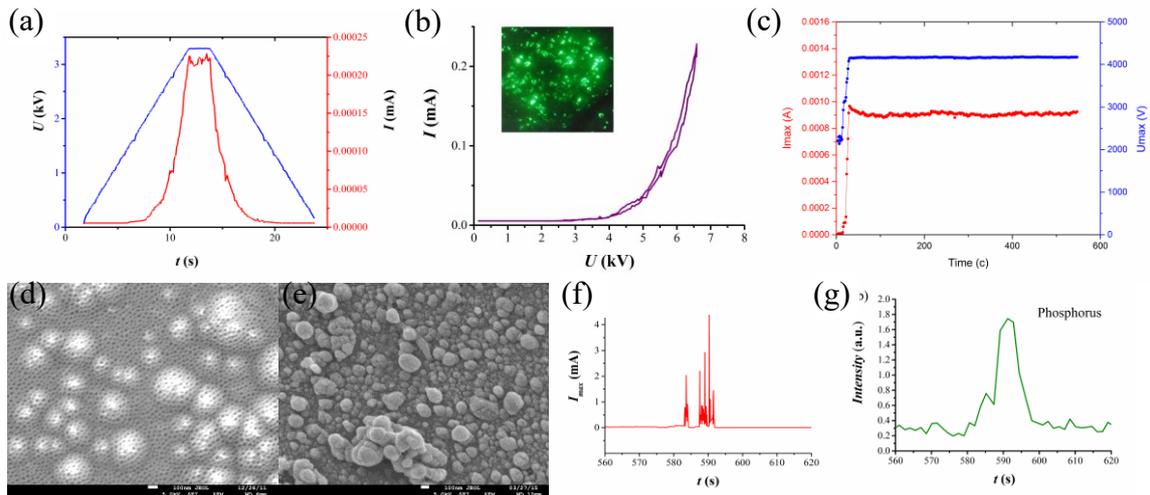


Рис.5. Характеристики ЖМИ, полученного на основе пористого GaP: (а) форма импульса в режиме медленного сканирования, (b) ВАХ и картина распределения эмиссионных центров, (с) временные зависимости амплитуд импульсов напряжения и эмиссионного тока в стабильном режиме, (d) SEM поверхности исходного пористого GaP, (e) SEM поверхности кристалла, обработанного вакуумными разрядами – сферические кристаллиты Ga, (f),(e) временные зависимости уровня эмиссионного тока и парциального давления фосфора, сопровождающие вспышку вакуумного разряда в ходе обработки пористого GaP

Жидкометаллический полевой эмиттер имеет ряд важных преимуществ перед твердотельным: 1) нет проблемы выравнивания параметров острий, существенной для твердотельных эмиттеров, так как параметры жидких эмиттеров определяются самим полем; 2) устойчиво работает в режиме взрывной эмиссии, длительная работа эмиттера обеспечивается восстановлением острий после каждого взрывного импульса; 3) устойчив к ионной бомбардировке в условиях плохого вакуума (нет накопления дефектов).

Ещё одним видом многоострийных эмиттеров на основе трековых мембран является твердотельный эмиттер со стохастическим массивом металлических микроострий [20a]. Эмиттер изготавливался путём химического осаждения никеля в полости треков лавсановой матрицы. Матрица была изготовлена путём облучения лавсана ионами аргона Ar^{+7} , ускоренными до энергии $E = 21.5$ МэВ, с последующей обработкой ультрафиолетом и щёлочью. Плотность ядерных треков составила $2.5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$. Полости имели форму конусов длиной $6 \mu\text{m}$ со средним диаметром основания $\sim 1.2 \mu\text{m}$ и радиусом вершин $\sim 35 \text{ nm}$. Исследование токовой характеристики напряжения с никелевым катодом проводилось в плунжерной камере, что позволило уменьшить приложенное напряжение до нескольких сотен вольт [20a].

Превосходные транспортные свойства некоторых проводящих органических полимеров позволяют предположить, что они могут также выступать в роли материалов для создания полевых катодов [24]. В работе [21a] нами было показано, что это относится к некоторым несопряжённым, нелегированным полимерам, нанесённым на плоский металлический электрод. Получена стабильная полевая эмиссия при 4 kV/mm . Однако на начальной стадии активации катода пороговое поле было в 2.5 – 3 раза больше. Эмиссия от чистых полированных металлов не наблюдалась вплоть до 25 kV/mm .

Атомно-силовая топография полимерной плёнки показала, что после полевых эмиссионных измерений исходная поверхность эмиттера оказалась значительно модифицирована: на поверхности полимера возникли многочисленные тонкие проводящие каналы с токами ~ 20 нА [22a].

Как показывает опыт, полимерные плёнки в качестве материала эмиттера демонстрируют хорошую адгезию к металлическим подложкам и устойчивость к вакуумным разрядам и термодеструкции. Более того, эмиттеры на основе полимерных плёнок не ухудшают вакуумных условий (в стабильном режиме). Описанные выше исследования с чистыми полимерными плёнками показали появление проводящих выступов, высота которых, недостаточна для получения высоких коэффициентов усиления поля. Характерная высота должна быть увеличена до 10-15 мкм. Поэтому, следующим шагом явилось создание проводящих каналов в виде нанонаполнителей из углеродных материалов, обладающих высокими аспектными соотношениями [23a][24a].

Мы создали достаточно разнообразную серию нанокompозитных полевых катодов. Первые эмиттеры были изготовлены на основе многостенных углеродных нанотрубок (MWCNT) производства Arkema высокой чистоты ($>90\%$) и полистирола (композит MWCNT-PS) [25a]. Композит был приготовлен путём смешивания раствора полистирол-ксилол с суспензией MWCNT-ксилол (10% нанотрубок и 90% полимера по массе). Для приготовления суспензии использовалась ультразвуковая ванна. Суспензия наносилась методом центрифугирования на полированные металлические таблетки: диаметр 1 см, материал – нержавеющая сталь, тантал, молибден и др. (Рис.6а). Для эмиттера MWCNT-PS были получены эмиссионные токи до 125 мА при приложенном потенциале 7 кВ и $d_{sep} = 0.5$ мм (Рис.6f) [5a]. Это достаточно высокий показатель по сравнению с образцами других исследователей, у которых плотности токов растут вместе с уменьшением площади катода [25].

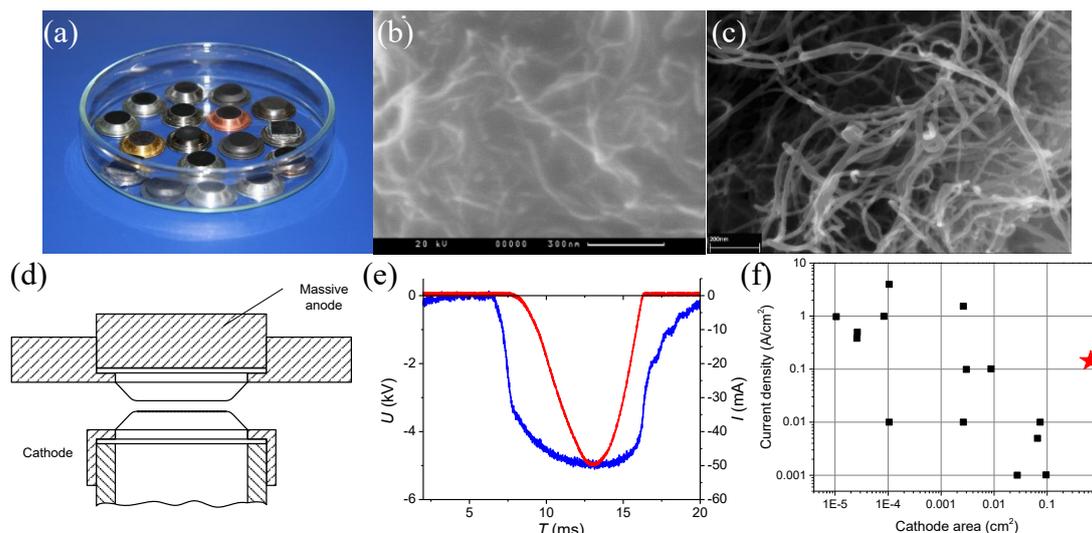


Рис.6. Характеристики эмиттера MWNT-PS: (a) Внешний вид образцов, (b) и (c) SEM нанокompозита до и после эксперимента, соответственно, (d) схема плоскопараллельного расположения электродов, (e) профили импульсов тока и напряжения, (f) сводная диаграмма достигнутых макроскопических плотностей токов с разных LAFE в зависимости от площади поверхности эмиттера (звездой отмечен наш эмиттер) (IVNC'07 в 2007 г.) [5a]

Глава 3 (Разработка комплексной методики исследования полевых эмиттеров). Постигшая полевую эмиссию неудача в становлении технологии полевых эмиссионных дисплеев [26], не остановила интенсивный поиск эффективных LAFE для других областей применения [27][29]. В начале главы даётся краткий обзор практических применений LAFE, демонстрирующий высокую актуальность и сложность их исследования. Подчёркивается важность регистрации процессов и явлений, сопровождающих работу LAFE.

Для того, чтобы понять физические и химические процессы при работе полевого эмиттера из нанокompозита (MWNT-PS) в режимах с большими токами, была разработана методика, включающая в себя эмиссионные измерения, а также регистрацию состава летучих продуктов и кинетики выделения газов в измерительной камере при помощи масс-спектрометрической аппаратуры. Методика позволяет изучать следующие процессы: «активация» эмиттера, старение эмиттера при эксплуатации, перенос материала с одного электрода на другой, термодеструкция полимера при повышенных эмиссионных токах, а также электронно-стимулированная десорбция нейтральных молекул с противоположного электрода. На Рис. 7 представлен эмиссионный модуль (MSFEU), созданный для подключения к масс-рефлектрону типа МСХ-6.

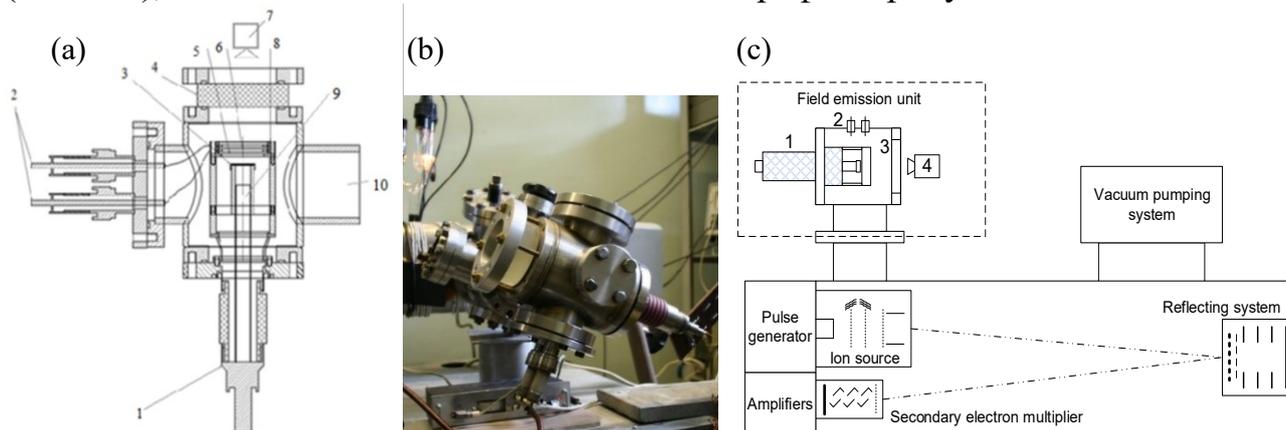


Рис.7. Масс-спектрометрическая методика для проведения полевых эмиссионных экспериментов: (a), (b) структура модуля MSFEU и его фотография, (c) MSFEU в составе масс-спектрометра МСХ-6: 1 – высоковольтный ввод с катодной системой; 2 – высоковольтный вывод; 3 – вакуумное окно; 4 – видеокамера

Полученные спектры деструкции полимеров показали высокую термическую и адгезионную стойкость полистирольной матрицы в ходе работы эмиттера в режиме больших токов автоэмиссии. При этом происходит интенсивная десорбция CO и CO₂ [25a] (Рис.8). Можно утверждать, что ниспадающий характер ступенек кинетики парциальных давлений CO и CO₂ (после каждого шага увеличения тока эмиссии) указывает на очистку поверхности анода.

Был предложен и реализован метод, позволяющий оценивать температуру эмитирующих CNT [6a], устанавливать корреляционные зависимости между током эмиссии, природой полимерной матрицы и фактической температурой "работающих" CNT. Для этого была разработана многоканальная система регистрации на базе прямопролётного масс-спектрометра (Рис.9).

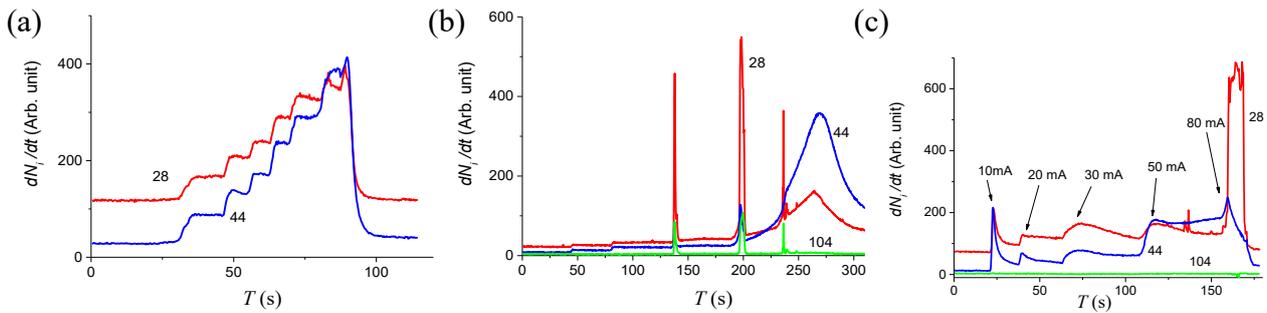


Рис.8. Кинетика летучих продуктов в ходе работы нанокompозитного LAFE: (a) электронно-стимулированная и (b) термостимулированная десорбции CO и CO₂ (резкие всплески – это пики стирола, связанные со случайными пробойными явлениями), (c) очистка анода и уменьшение концентрации CO₂ в режиме больших токов эмиссии

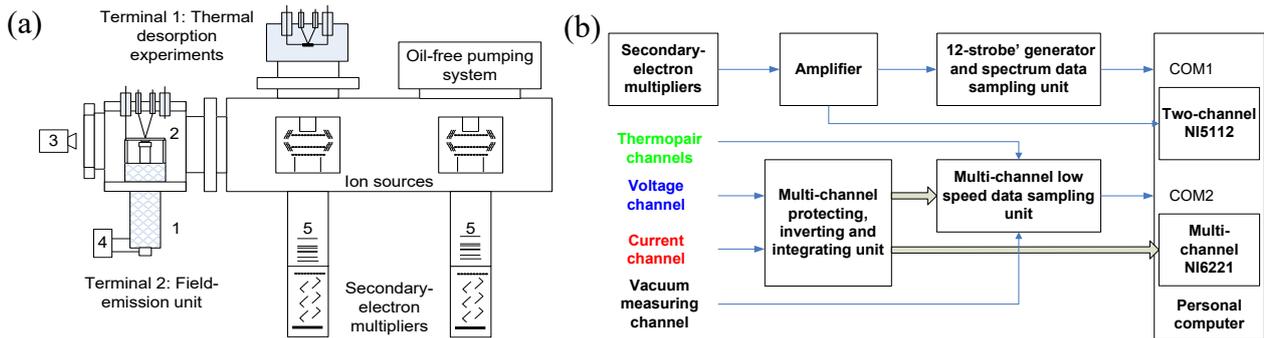


Рис.9. Прямопролетный масс-спектрометр с MSFEU: (a) схема установки, где 1 – высоковольтный ввод, 2 – катодная система, 3 – веб-камера, 4 – мультиметр, 5 – труба дрейфа, (b) схема измерений

Для записи ВАХ мы использовали карту National Instruments NI 6221. Полный масс-спектр фиксировался с помощью компьютерной платы скоростного осциллографа NI 5112. Стробоскопическая система позволяла выводить кинетику выбранных пиков на компьютер.

На Рис.10 приведены синхронно зарегистрированные зависимости от времени: напряжения, тока эмиссии и интенсивности летучих продуктов для трёх типов нанокompозитных эмиттеров на основе нитроцеллюлозы, полистирола и полиметилакрилата (NC, PS, PMMA) [26a]. Судя по кинетике термодеструкции, время до начала термодеструкции у PMMA и NC, намного меньше, чем у PS. Наблюдается сильное выделение мономеров PS в конце инкубационного периода. Точковая стабильность наихудшая у PMMA и наилучшая у NC. Оценкой термостойкости композитных эмиттеров может служить отношение температуры эмиссионного центра (T_{TD_start}), определяемой началом термодеструкции полимерной матрицы, к среднему значению эмиссионного тока: $\alpha = T_{TD_start} / I_{FE}$. Значения α для MWCNT-PS, MWCNT-PMMA и MWCNT-NC следующие: 35, 9 и 8 К/мА [27a].

Отметим, что разнообразие методов создания и нанесения наноструктур LAFE, различные условия их функционирования не позволяют унифицировать данные, сделать выбор в пользу того или иного материала с наилучшими или, по крайней мере, ожидаемыми характеристиками. Причина заключается в отсутствии методики стандартизации (паспортизации) LAFE.

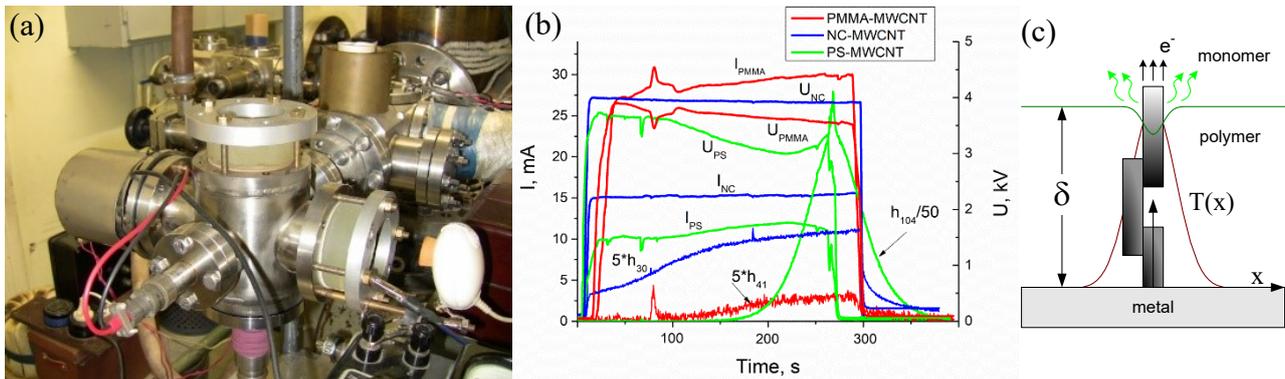


Рис.10. Установка с одновременной регистрацией ВАХ и масс-спектров: (а) вид измерительной камеры, (b) сравнение кинетик тока, напряжения и парциального давления основного осколка для трёх типов матриц (NC, PMMA, PS), (c) модель термодеструкции полимерной матрицы вблизи эмиссионного центра

Полевая эмиссионная электроника заслуживает своей медали исследования, которая позволяла бы исследовать эмиссионные поверхности непосредственно в ходе полевой эмиссии. Далее в Главе 3 даётся описание разработанной комплексной методики исследования LAFE.

Рассмотрим основные принципы, лежащие в основе нашего подхода. **Первый принцип** – многоканальный сбор данных, как вольт-амперных характеристик, так и данных сопровождающих полевую эмиссию явлений: температура электродов, давление, состав летучих продуктов, картины свечения (показывают распределение и активность эмиссионных центров на поверхности LAFE) (Рис.11а,б). **Второй принцип** – методы сканирования высоким напряжением в быстром и медленном режимах (Рис.11с). **Третий принцип** – это исследование эмиссионного процесса *in situ*, путём программного управления и онлайн обработки данных эмиссионного эксперимента (Рис.11д).

Общая концепция исследования LAFE может быть представлена в виде трёх направлений: *экспериментальных исследований* (регистрация эмиссионных характеристик по разработанной методике), *теоретических* (вывод основных уравнений полевой эмиссии, построение многокомпонентных ВАХ) и *моделирование* (моделирование электрических полей различных форм эмиттеров, а также потоков и построение теоретических ВАХ), а также трёх основных параметров LAFE (коэффициент усиления поля – FEF, площадь эмиссии – FEA, работа выхода – ϕ).

Приведём таблицу сравнения обычных методик измерения и современных методик исследования в режиме реального времени (см. Табл. 1). Аналогичная таблица была представлена в работе М.М. Kopelvski et al. [7]. Можно утверждать, что наша методика значительно превосходит зарубежные аналоги по развитым методам онлайн обработки ВАХ и картин свечения. Основными отличительными особенностями являются: применение быстрого режима сканирования высоким напряжением, позволяющее производить статистический анализ регистрируемых характеристик, а также развитая онлайн обработка картин свечения, позволяющая следить за отдельными центрами эмиссии и строить эмиссионный профиль поверхности LAFE (Рис.12).

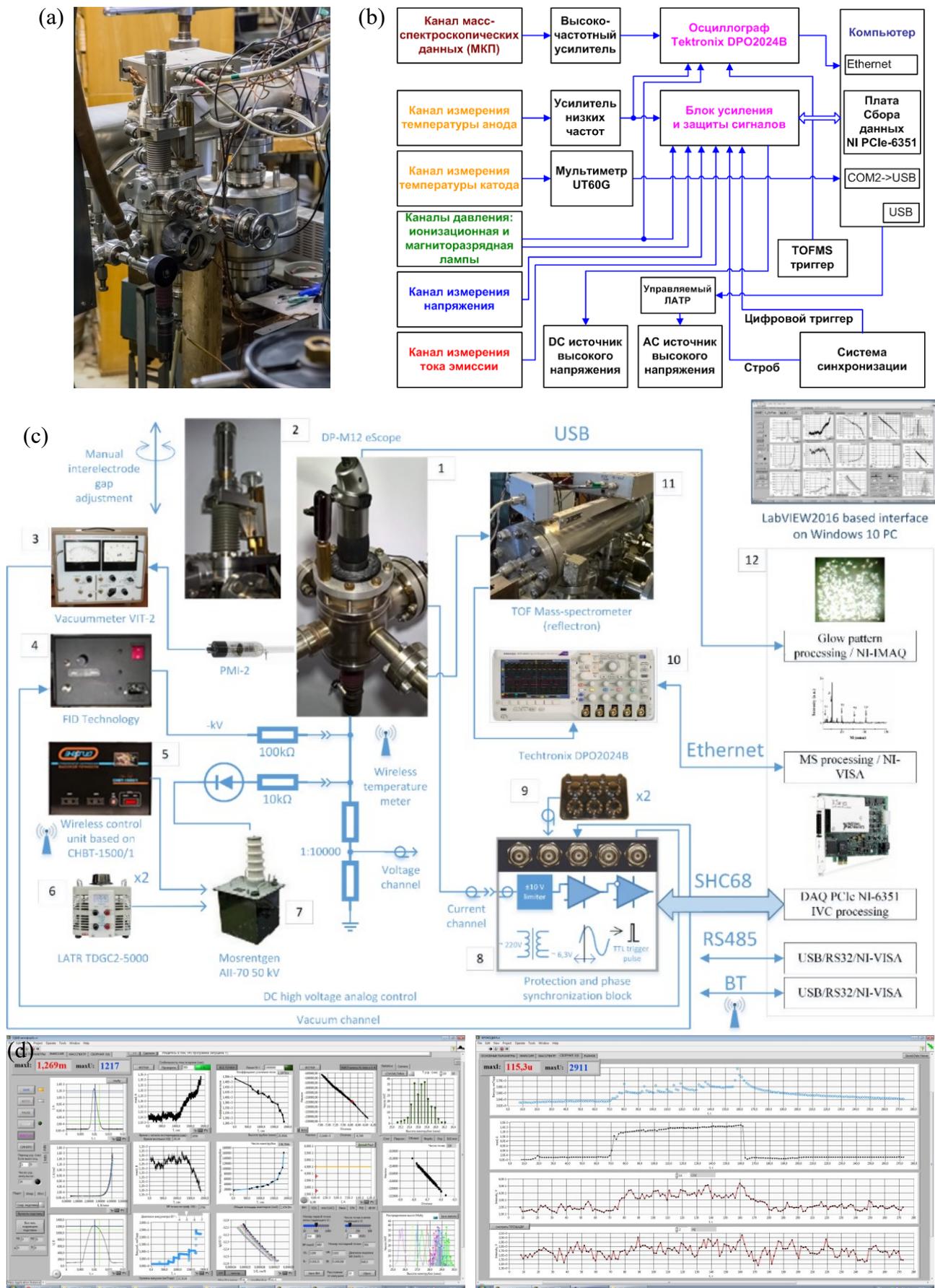


Рис.11. Комплексная методика исследования LAFE (ФТИ им. Иоффе): (а) внешний вид, (б) многоканальная система сбора данных, (с) методика сканирования высоким напряжением, система синхронизации и защиты (д) программная обработка в режиме реального времени

Таблица 1. Сравнение обычной методики исследования полевых эмиттеров и систем реального времени, в том числе разработанной в ФТИ

Методы анализа	Виды систем, доступность данных в режиме реального времени			
	Традиционные измерения	Методика М.М. Kopelevski (Бразилия)	Методика Барышева С.В. (США)	Методика ФТИ им. А.Ф.Иоффе
Вольт-амперные характеристики полевых катодов/Зависимость эмиссионного тока от времени	да	да	да	да
ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма	да (единичные работы)	н/д по реализации	нет	да
Эмиссионный ток от межэлектродного расстояния	в ряде работ (ручная регулировка)	да (автоматизированная по 3-м осям)	н/д (ручная регулировка)	да (ручная; возможность поворота на 90°)
Эмиссионные гистограммы	нет	да	нет	да
Средние значения и стандартные отклонения	нет	да	нет	да
График в модифицированных координатах FN	нет	нет	нет	да
Эмиссионная картина в режиме реального времени	нет (фотографии)	да	да (без real-time обработки)	да
3D представление ПЭ/ Накопление, усреднение эмиссионных данных	нет	да	нет	да
Максимальные значения эмиссионного тока в ходе эксперимента (максимальные яркости свечения)	нет	да (3D распределение яркости)	нет	да (3D распределения яркости, тока и FEF) (см. Рис.12)
Локальные эмиссионные характеристики	нет	по выбранным областям поверхности катода	нет	да
Методы обработки ВАХ*	нет	нет	нет	да
Вид ПО	DOS	LabVIEW 2012	LabVIEW	LabVIEW 2016

*SK-диаграмма/ Тест на соответствие полевой эмиссии/ Обработка данных по диапазонам ВАХ/ Метод локального градиента / Метод минимального отклонения (I/U^k vs $1/U$)

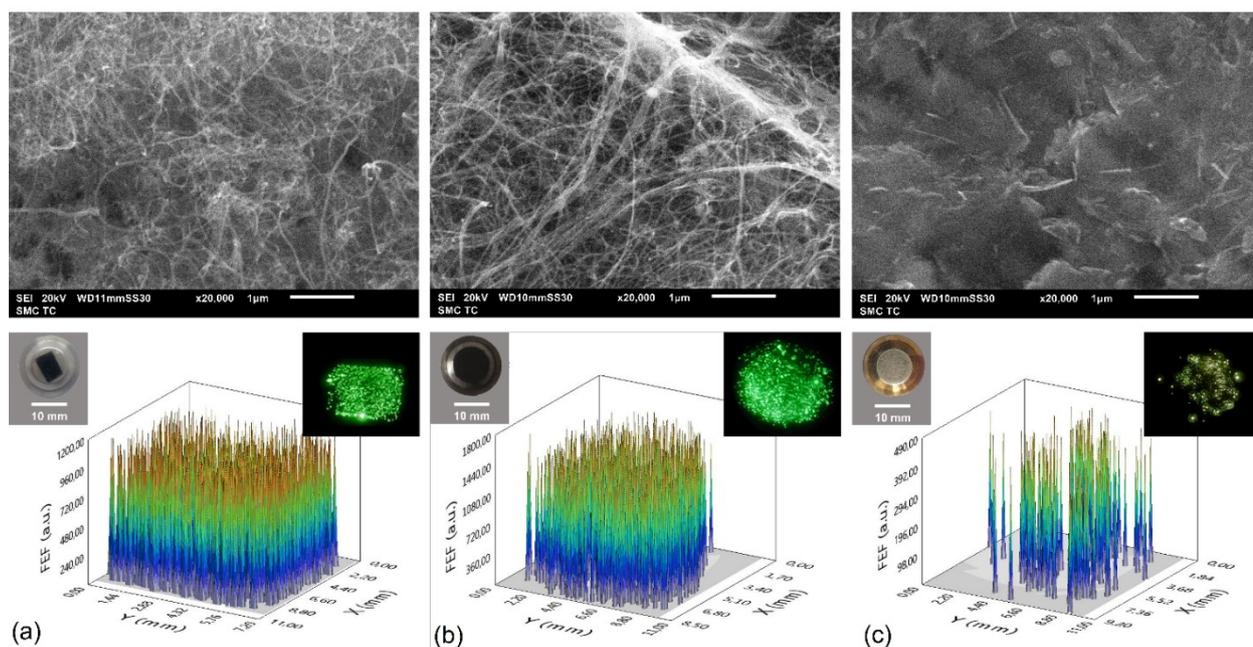


Рис.12. SEM поверхности и распределение FEF для MWCNT (a), SWCNT-PS (b), G-PS (c) [11a]

Глава 4 (Новейшие методы обработки ВАХ). Применение компьютерной обработки во время записи ВАХ открывает дополнительные возможности познания эволюции и принципов работы полевого эмиттера, позволяет апробировать модели физических процессов непосредственно во время эмиссионного эксперимента.

Один из предлагаемых японскими учёными методов исследования поведения полевого эмиттера в различных условиях является, так называемый, SK-анализ [30]. Так, в работе [31] был теоретически обоснован флуктуационный разброс параметров эмиссии и построена SK-диаграмма. Нам удалось получить аналогичную диаграмму и выявить ряд её особенностей [28a]-[29a][30a]. Были исследованы статистические параметры эмиссионных характеристик LAFE на основе нанокompозита MWCNT-PS. Полученный за определённый промежуток времени массив эффективных высот h подвергся статистической обработке и строилась его гистограмма (Рис.13а). Это позволило оценить распределение эмиссионных центров на поверхности катода и проследить его изменение при изменении макроскопических параметров эксперимента.

На Рис.13б показано изменение статистики h при увеличении уровня эмиссионного тока. Смещение среднего арифметического в сторону меньших высот связано с включением в процесс эмиссии более низких нанотрубок.

Применение онлайн обработки ВАХ позволило разработать новый метод анализа SK-диаграмм. Он основан на построении градуировочной сетки с учётом приращения работы выхода $\Delta\phi = 4\pi N\alpha_p F = \xi F$ (где N – концентрация адсорбатов, α_p – поляризация), предложенной в работе Гомера [32]. В основе расчётов лежит функциональная зависимость площади эмиссии образца от коэффициента усиления поля. Подобная градуировка экспериментальных данных позволяет оценить работу выхода, радиус или коэффициент усиления поля эмиссионных структур [31a].

Эксперименты с нанокompозитом на основе графена (G-PS) с применением онлайн SK-анализа показали, что при увеличении уровня тока вместе с ростом работы выхода падает эффективный коэффициент усиления поля γ с 550 до 460 (Рис.13с). Это смещение вызвано изменением равновесной концентрации адсорбатов N , сопровождаемое включением в процесс эмиссии более «низких» наночетров.

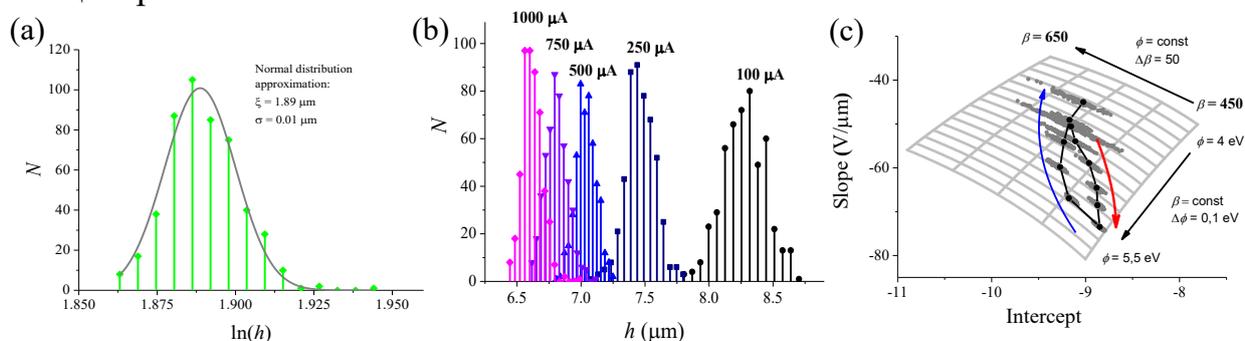


Рис.13. Статистический анализ ВАХ нанокompозита MWCNT-PS: (а) гистограмма распределения логарифма эффективных высот эмиссионных центров (уровень тока 1 мА), (б) характерное смещение распределения эффективных высот при изменении уровня тока, (с) SK-диаграмма изменения ВАХ G-PS при ступенчатом увеличении и уменьшении тока

С применением метода высоковольтного сканирования (быстрый и медленные режимы) и техники многоканальной записи и онлайн обработки характеристик полевой эмиссии были обнаружены и исследованы особенности поведения ВАХ. Прямой и обратный гистерезис наблюдались в одном и том же полевым эксперименте, и были выявлены закономерности перехода одного вида гистерезиса в другой (Рис.14а,б). В частности, была обнаружена зависимость формы гистерезиса от длительности сканирования высоким напряжением, а также зависимость от типа CNT в нанокompозите.

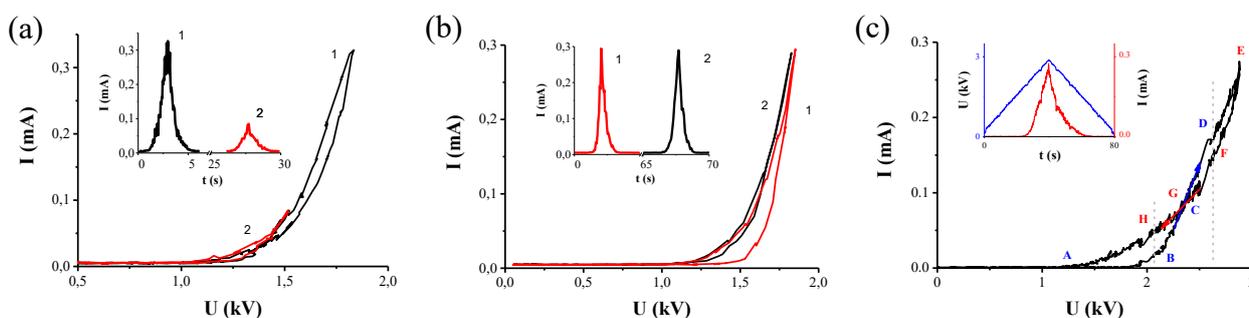


Рис.14. Различные типы гистерезиса ВАХ в медленном режиме сканирования: (а) переход прямого гистерезиса эмиттера SWCNT-PS (импульс 1) в обратный (импульс 2) при уменьшении амплитуды импульса развёртки, (б) переход обратного гистерезиса SWCNT-PS (импульс 1) в прямой (импульс 2) для повторных импульсов, (с) гистерезис в виде восьмёрки эмиттера G-PS.

Форма восьмёрки в ВАХ указывает на наличие конкурирующих физических процессов (Рис.14с) [33а][31а]. В предложенной феноменологической модели используются следующие аспекты: процессы адсорбции / десорбции молекул CO_2 (они увеличивают работу выхода центров эмиссии), два набора эмиссионных центров – высокие и низкие (это подразумевает неоднородность эмиссионной поверхности), Джоулев нагрев наночастиц (пропорционален соответствующему эмиссионному току), изменение концентрации CO_2 в межэлектродном пространстве (вызвана электронно-стимулированной десорбцией на поверхности анода).

Несмотря на то, что анод был отполирован и проходил ультразвуковую очистку в ацетоне, масс-спектр показал, что в условиях электронно-стимулированной десорбции наблюдается испускание метана (массовые пики 15 и 16), а затем и аммиака (16 и 17) с небольшой задержкой (Рис.15а). На графиках видно, что массовый пик 17 не связан с водой. После этой электронно-стимулированной очистки поверхности анода, подобная кинетика масс-спектров CH_4 и NH_3 при работе эмиттера не наблюдается [31а].

Было установлено, что на начальном этапе работы свежеприготовленного эмиттера происходят вакуумные разряды, приводящие к тренировке его поверхности и в то же время переносу больших молекулярных кластеров на противоположный электрод. При этом в межэлектродном промежутке основным летучим продуктом является ацетилен (Рис.15б). В случае отождённого анода и длительной эксплуатации образца десорбция молекул CO и CO_2 не происходит. При значительном нагреве анода наблюдается термодесорбция воды (Рис.15с).

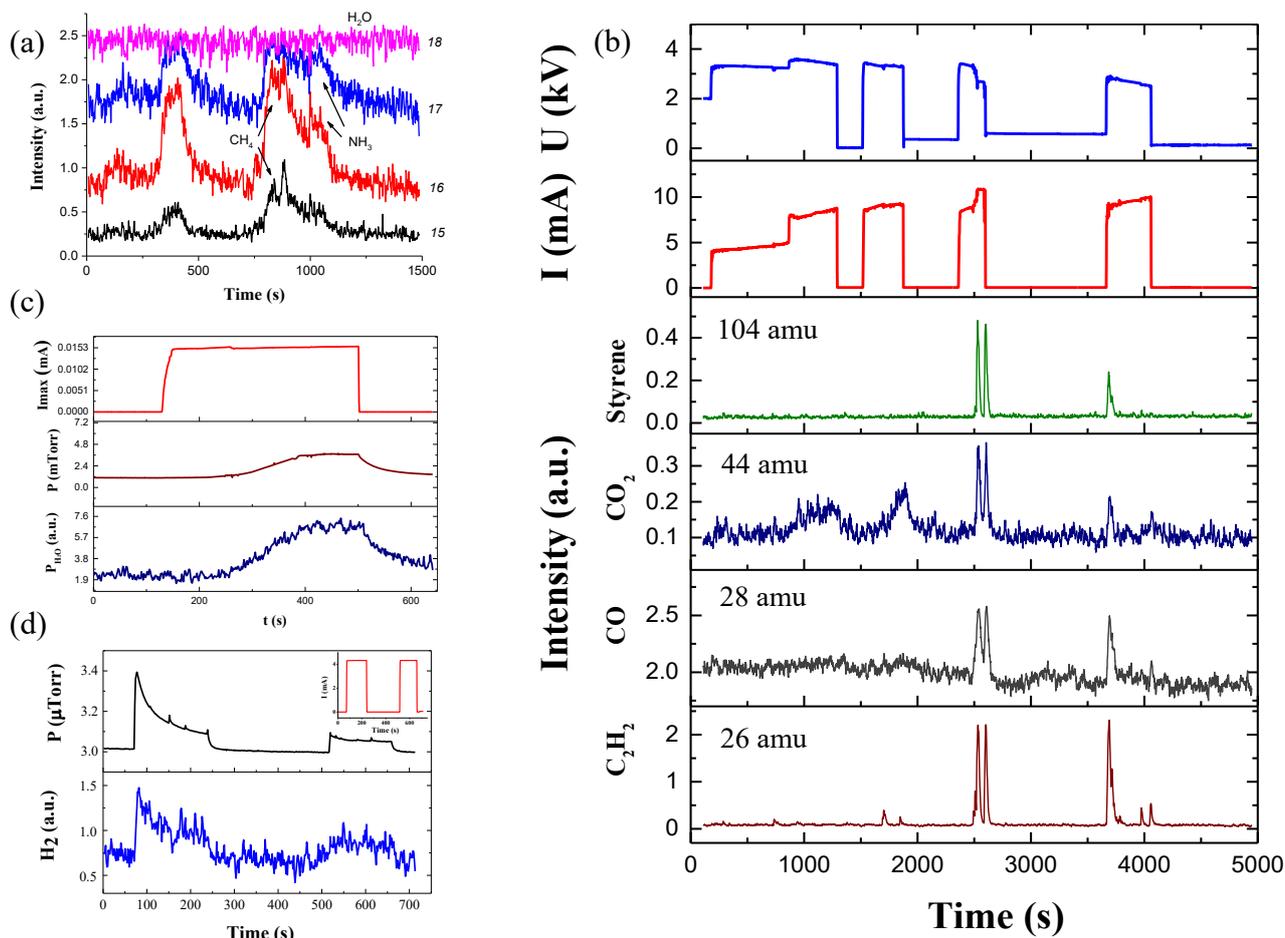


Рис.15. Масс-спектрометрические данные эксперимента с наноккомпозитом MWCNT-PS: (a) подача двух последовательных импульсов в систему с неотожжённым анодом, (b) кинетика основных летучих продуктов (стирола, диоксида углерода, оксида углерода, ацетилена) при длительном нагреве эмиттера током, (c) временные зависимости уровня тока, полного давления и парциального давления H₂O при высоких эмиссионных токах ~ 15 мА, (d) временные зависимости полного давления и парциального давления водорода при первоначальном включении эмиттера (на вставке временная зависимость уровня тока)

Изучение влияния выдержки эмиттера в вакуумных условиях без напряжения, а также опыты с приложением к образцу напряжений обратной полярности указывают на способность эмиссионной системы сорбировать водород. На Рис.15d показано импульсное включение эмиссионного тока: в течение примерно 5 минут наблюдается заметный спад уровня вакуума и уменьшение интенсивности выделения водорода. При втором включении интенсивность испускания водорода продолжается с того же уровня, который оставался в момент снятия высокого напряжения.

Если применять стандартную теорию полевой эмиссии к обработке экспериментальных ВАХ, то можно получить важные параметры LAFE: эффективный FEF и эффективную FEA. Эти величины являются усреднённой оценкой микроскопических параметров отдельных эмиссионных центров. Однако, если поведение LAFE сильно отклоняется от стандартной теории, то извлечённые FEF и FEA дадут ложное представление о микроскопических свойствах эмиттера [18].

Р. Форбс в 2013 г. предложил тест для выявления неклассического (неортодоксального) поведения LAFE [17]. Можно показать, что существует простое соотношение для наклона экспериментальной ВАХ-ФН, и безразмерного поля f для каждого конкретного значения X (приложенное напряжение, макроскопическое поле):

$$f = -\eta s(f) \frac{X}{S^{fit}} \quad (8)$$

Для практического применения достаточно взять приближение $s(f) \approx 0.95$.

Основным параметром для расчёта безразмерного поля f является S^{fit} . На практике с помощью этого наклона определяются два значения f_1 и f_2 , соответствующие X_1 и X_2 ($U_1 \div U_2$ – диапазон прикладываемых напряжений), которые сравниваются с набором из четырёх определенных значений $\{f_{lb} < f_{low} < f_{up} < f_{ub}\}$ (тест Форбса) [34a]. Для $\varphi = 4.50$ эВ этот набор равен $\{0.10, 0.15, 0.45, 0.75\}$; наборы для других значений работы выхода могут быть получены из данных работы [17] или более точно – из графика, представленного в первой главе (Рис.1b).

Для реализации теста Форбса был разработан специальный программный модуль (LabVIEW), который анализирует ВАХ в режиме реального времени с применением алгоритма изменения диапазона выбранных напряжений. На Рис.16 представлен результат анализа ВАХ, полученной для SWCNT-PS.

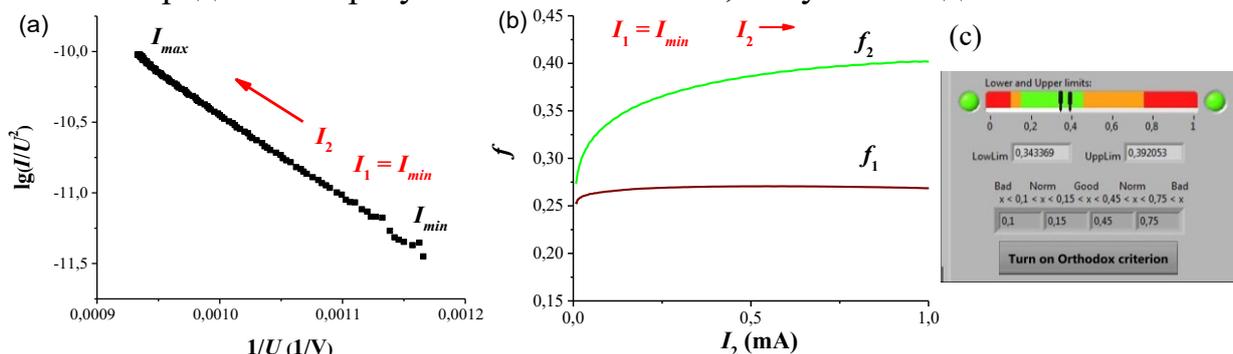


Рис.16. Расчётные зависимости для быстрого сканирования на нанокompозитном эмиттере: (a) ВАХ для SWCNT-PS, (b) соответствующая зависимость от границы диапазона сканирования параметров f_1 и f_2 . Индикатор соответствия классическому полевому режиму (c)

В ряде работ наблюдаются характерные изгибы ВАХ-ФН, и возникает вопрос о корректности описания ансамбля из nanoострий с помощью классической зависимости Фаулера-Норгейма. Воспользуемся упрощённой моделью многоострийного эмиттера, предложенной в работе [33]. Распределение эмиттеров по FEF можно свести к бинарному набору, γ_1 и γ_2 , где $\gamma_1 > \gamma_2$. При этом считается, что соотношение числа центров в группах: $\rho(\gamma_1) < \rho(\gamma_2)$. Иными словами, коротких эмиттеров значительно больше, чем длинных. Полный эмиссионный ток такого набора:

$$I = \sum_{i=1}^2 \rho(\gamma_i) J_C^i(\gamma_i) \sigma A_L n_L = \sum_{i=1}^2 J_C^i(\gamma_i) A_e^i \quad (9)$$

где A_e^i – суммарная площадь эмиссии для всех эмиттеров, имеющих FEF равный γ_i , σ – показатель эффективности условной площади единичного полевого эмиттера, n_L – число наноцентров, A_L – площадь основания наноцентра.

Был реализован онлайн синтез (подгонка) ВАХ непосредственно в полевом эксперименте. На основании захваченного сигнала строилась линейная аппроксимация Элинсона-Шредника (7) и из неё определялись эффективные FEF и FEA. Порядок подбора двухкомпонентной ВАХ-ФН: сначала подбирается наклон для участка ВАХ-ФН с большими напряжениями (этому наклону соответствует пониженный FEF), затем подбирается вторая ВАХ для малых напряжений. Варианты подгонки приведены на Рис.17 [35a]. Двухкомпонентный набор FEF для LAFE подтверждается и результатами обработки картин свечения как по яркости (Рис.17), так и в пересчёте на коэффициенты усиления поля.

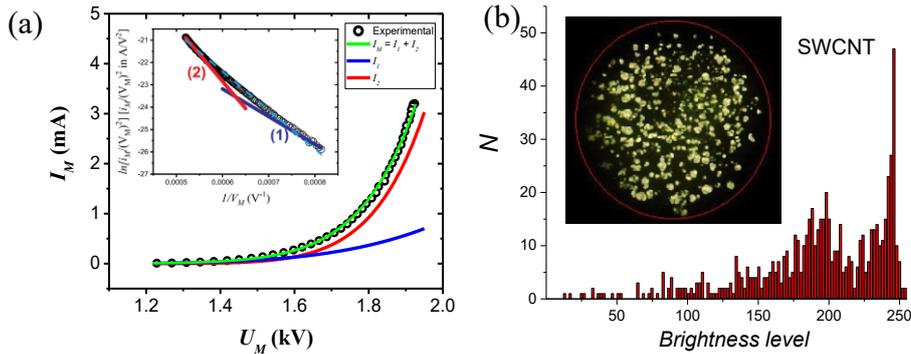


Рис.17. Двухкомпонентное распределение центров LAFE SWCNT-PS: (a) ВАХ, измеренная при $d_{sep} = 350$ мкм, пунктирные линии представляют двухкомпонентный набор модельного эмиттера (на вставке показан соответствующий ВАХ-ФН), (b) экспериментальная гистограмма распределения яркости эмиссионных центров, измеренная при токе $I_M \sim 660$ мкА

В основной теории Фаулера-Нордгейма предполагается линейная связь между макроскопическим током I_M и базовой характеристической плотностью тока J_{kC} , даже в отношении LAFE. Однако недавние теоретические работы в рамках стандартной теории [34] предсказывают степенную зависимость между этими двумя величинами (даже при условии соответствия ВАХ тесту на полевую эмиссию): ($I_M \sim (J_{kC})^{\omega_0}$). Рассмотрим двухкомпонентный набор J_{2kC}, J_{1kC} , в котором $\gamma_2 = r\gamma_1$. В рамках этой модели было получено следующее соотношение [36a]:

$$J_{2kC} = \frac{r^{2-\eta/6} a \varphi^{-1} (\gamma_C F_M)^{2-\eta/6} \exp(\eta) F_R^{\eta/6}}{[a \varphi^{-1} (\gamma_C F_M)^{2-\eta/6} \exp(\eta) F_R^{\eta/6}]^{1/r}} J_{1kC}^{1/r} \quad (10)$$

Продифференцируем логарифм макроскопической плотности тока по логарифму плотности тока наиболее длинных острий ($J_{kC} = J_{1kC}, \gamma_C = \gamma_1$):

$$\omega_0 = r^{-1} = \frac{\partial \ln(I_M)}{\partial \ln(J_{kC})} \quad (11)$$

Мы экспериментально подтвердили степенную зависимость между I_M и характеристической плотностью тока J_C для неориентированных LAFE на основе SWCNT и MWCNT [36a]. С помощью данных гистограммы распределения FEF отдельных эмиссионных центров (Рис.18a), полученных из анализа картин свечения, была рассчитана J_{kC} . Расчёт ω_0 по (11) с построением линии тренда дал величину $\sim 1,46$ (Рис.18b). Это позволило рассчитать FEF наиболее высоких центров с использованием значений эффективной FEF (γ_{eff}) (Рис.18a) с достаточно большой точностью: отклонение от значений на гистограмме составило $\sim 3.0\%$. В то же время отклонение максимальных FEF на гистограмме от эффективного FEF оказалось существенным ($\sim 33\%$).

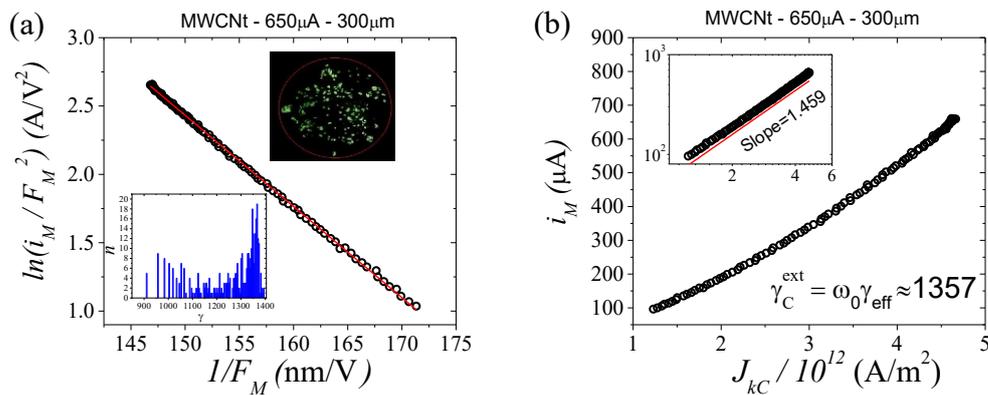


Рис.18. Определение параметров распределения наночентров LAFE MWCNT-PS: (a) ВАХ-ФН (верхняя вставка показывает картину распределения эмиссионных центров по поверхности эмиттера, на нижней показано распределение локальных FEF), (b) зависимость тока, измеренного экспериментально, от плотности теоретического тока на вершине эмиттера

В работе поднят вопрос о соотношении эффективной площади эмиссии, извлекаемой из обработки ВАХ-ФН, и теоретических понятий FEA [37a][38a]. Экспериментально был обнаружен рост FEA с ростом приложенного напряжения. Проведён расчёт эффективной FEA на основе трёхмерного моделирования нанотрубок (модель hemisphere on the post – HCP). Проведён анализ многообразия видов формального определения FEA и их зависимости от напряжения в модели HCP [37a]. Показано соотношение между известными видами оценок FEA. Формальная FEA (отношение полного тока к плотности тока на вершине) для HCP обеспечивает только ~75% полного тока.

Проведена систематизация методов определения эффективных значений FEF и FEA с учётом различных видов уравнения FN-типе. Предложен способ экспериментальной оценки FEA с применением модифицированных координат Фаулера-Нордгейма (координаты "MG-plot"). Экспериментально получены оценки FEA для участков ВАХ наноккомпозитных LAFE на основе SWCNT и MWCNT с применением формул Элинсона-Шредника (тангенциальный метод) и Мерфи-Гуда (с температурной поправкой, методом анализа эффективной площади и базовой плотности тока, методом поправочных коэффициентов, методом построения ВАХ в координатах MG) (Рис.19).

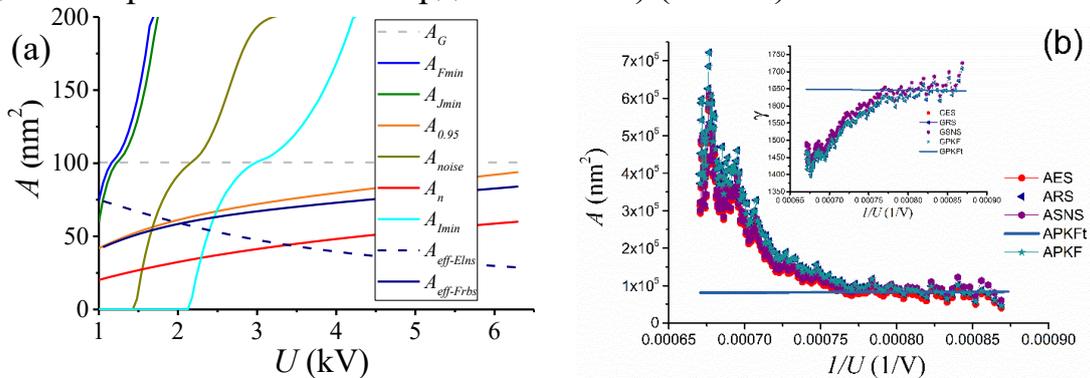


Рис.19. (a) Зависимость разных видов FEA от напряжения в модели HCP. (b) Зависимость разных видов эффективной FEA от обратного напряжения, построенная по данным экспериментальной ВАХ для SWCNT-PS (на вставке – такая же зависимость для FEF) [38a]

Рассмотрено понятие локальных эмиссионных характеристик, показана актуальность их оценки. Были решены аппаратно-программные вопросы захвата и обработки эмиссионных картин свечения [10a]. Найденные положения эмиссионных центров, их яркости и токовые нагрузки позволяют построить распределение центров по уровню яркости, по расстоянию до центра эмиттера и по углу расположения относительно центра, а также по величине токовой нагрузки на сектор поверхности. Токовая нагрузка на каждый центр вычислялась в соответствии с его яркостью, взятой как весовой коэффициент. Сравнение экспериментальных распределений с идеальными путём расчёта статистических коэффициентов, позволило численно оценить качество LAFE.

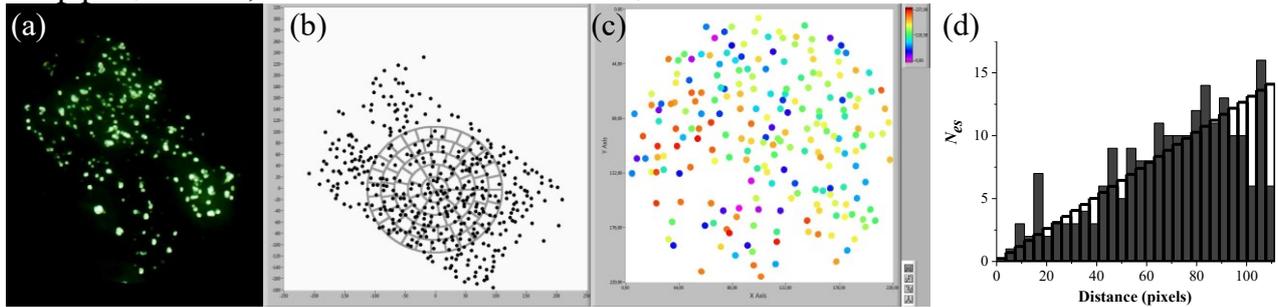


Рис.20. Анализ поверхности LAFE из MWCNT (режим онлайн): (a) картина свечения, (b) расположение эмиссионных центров и выбор круговой зоны анализа, (c) распределение центров по максимальным яркостям, (d) гистограмма распределения центров по расстоянию

Реализованы несколько алгоритмов определения локальных FEF и FEA. Первый основан на анализе полной ВАХ и оценке числа эмиссионных центров по кривой сбора: эффективные γ_{eff} и A_{eff} . Второй основан на построении эмиссионного профиля LAFE (распределение локальных FEF при заданном уровне тока) с фиксированной FEA одного эмиссионного центра: A_I и γ_{locA_I} . Третий основан на построении массива локальных ВАХ и их анализе в координатах ФН: γ_{loc} и A_{loc} (Рис.21) [11a]. На Рис.22 приведены характерные локальные и полные ВАХ. Полученные γ_{eff} и A_{eff} хорошо коррелируют с γ_{loc} и A_{loc} . Однако из-за адсорбционных процессов не все локальные ВАХ имеют пригодную для анализа форму, так что второй алгоритм (γ_{locA_I}) оказывается более универсальным, чем третий.

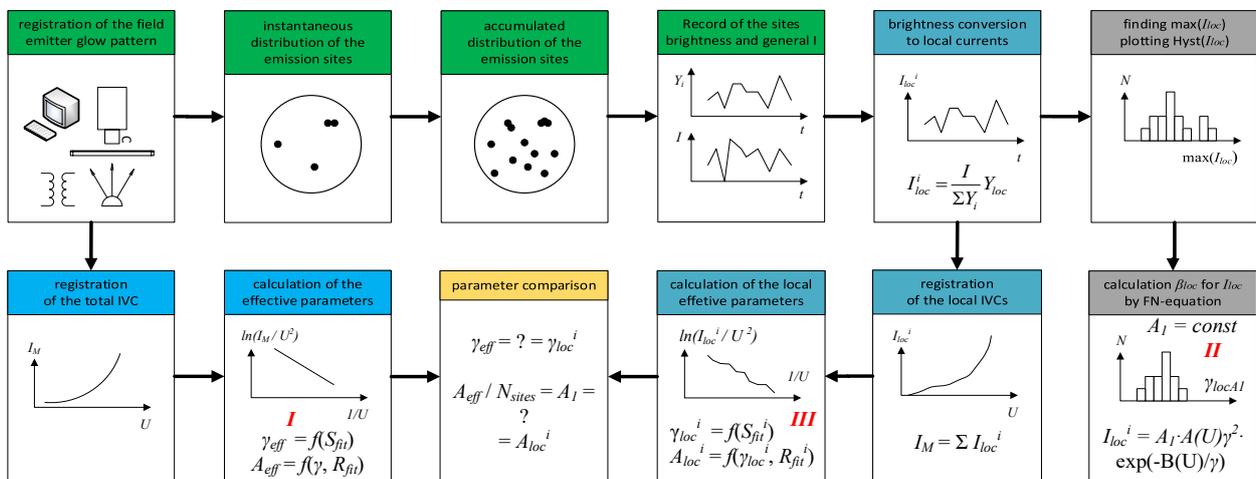


Рис.21. Схема обработки ВАХ и картин свечения для расчёта FEF и FEA: I – по полной ВАХ, II – по локальным токам при постоянном уровне тока, III – по локальным ВАХ

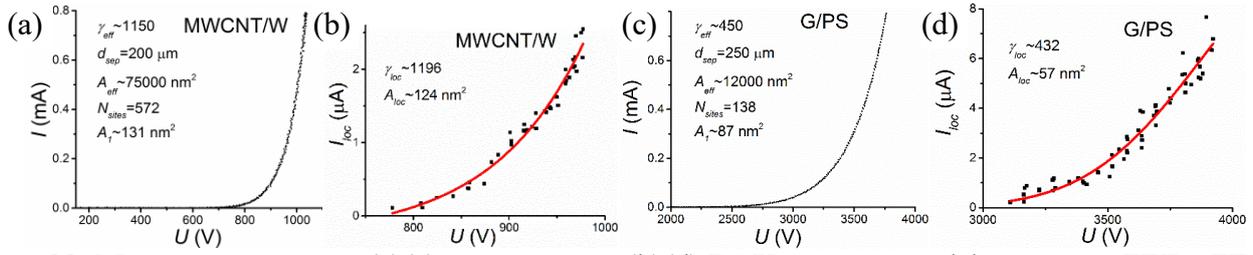


Рис.22. Макроскопические (а)(с) и локальные (б)(д) ВАХ с оценкой эффективных FEF и FEA

В теоретической работе [35] был поставлен вопрос об экспериментальном определении степени k напряжения в предэкспоненциальном множителе уравнения полевой эмиссии и был предложен метод локального градиента, основанный на построении ВАХ в дифференциальных координатах: $d \ln(I/V^2)/d \ln(V)$ vs $1/V$. Мы предложили ещё один метод – метод минимального отклонения (нахождение минимального отклонения Res от линейного тренда в координатах $\ln(I/U^k)$ vs $1/U$). Оба метода были встроены в программу онлайн обработки данных и применены к анализу ВАХ реальных LAFE, а также модельных ВАХ [39a]-[41a] (Рис. 23). Полученные значения k близки к результатам 3D моделирования полей в модели НСР. Метод оценки степени напряжения является новым критерием соответствия экспериментальных данных режиму классической полевой эмиссии.

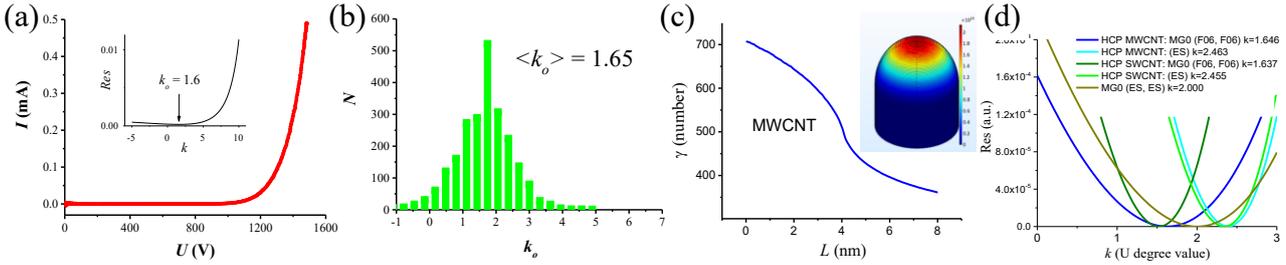


Рис.23. Определение степени напряжения в законе ФН: (а) экспериментальная ВАХ (LAFE из SWCNT-PS), на вставке – график $Res(k)$, (б) гистограмма флуктуации экстремума k_o , (с) расчётные FEF как функции расстояния L от вершины эмиттера по его поверхности (HCP) ($h/r_c = 1250$, $\gamma_c = 734$), (д) зависимости $Res(k)$ для модели HCP с разными уравнениями FN-type

Впервые был применён анализ ВАХ в режиме онлайн в модифицированных координатах Фаулера-Нордгейма: $X' = 1/U$ и $Y' = \ln(I / U^{2-\eta/6})$. На Рис.24 представлено изменение эффективных FEF и FEA, включая их статистику, при переключении измерительной системы на анализ ВАХ в координатах MG [42a]. Проведён тест на полевую эмиссию в новых координатах.

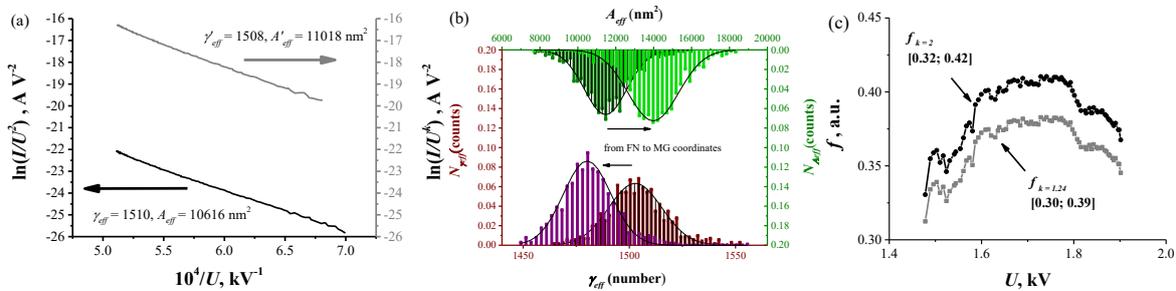


Рис.24. Применение модифицированных координат FN в эксперименте с нанокompозитным LAFE: (а) ВАХ в координатах ФН и MG с оценкой эффективных FEF и FEA в режиме онлайн. (б) Гистограммы флуктуационного разброса FEF и FEA. (с) Изменение безразмерного поля на поверхности эмиттера при вариации диапазона напряжения

Основные результаты работы

Разработана новая уникальная методика исследования многоострийных полевых эмиттеров, представляющая собой комплексную многоканальную систему сбора и обработки данных в режиме реального времени. Созданы измерительные стенды, обеспечивающие многократный анализ ВАХ методом сканирования высоким напряжением.

Метод анализа полевых эмиттеров на соответствие классической теории полевой эмиссии реализован для обработки ВАХ в режиме реального времени. Установлено, что значения безразмерного поля f , полученные для нанокompозитных эмиттеров, находятся в пределах ожидаемого диапазона и соответствуют классической теории полевой эмиссии.

Разработана методика построения эмиссионного профиля LAFE и анализа качества распределения эмиссионных центров. Путём онлайн анализа картин свечения и синхронной онлайн-обработки ВАХ получены характеристики индивидуальных эмиссионных центров.

Экспериментально подтверждена двухкомпонентная модель распределения коэффициентов усиления поля в нанокompозитных LAFE. Дифференцирование ВАХ позволило выявить эмиссионные структуры с повышенным значением FEF.

Экспериментально применён метод оценки степени напряжения предэкспоненциального множителя в уравнении Фаулера-Нордгейма, основанный на вариации степени k в координатах $\ln(I/U^k)$ vs I/U . Впервые применена обработка экспериментальных ВАХ в координатах Мерфи-Гуда.

Разработан новый метод онлайн обработки ВАХ, основанный на анализе SK-диаграммы с построением градуировочной сетки эффективных микроскопических параметров LAFE – работы выхода и FEF.

Выявлены причины возникновения гистерезиса в ВАХ полевых эмиттеров. Обнаружены условия перехода от «обратного» гистерезиса к «прямому». На основании анализа ВАХ и масс-спектрометрических данных предложена феноменологическая модель адсорбции-десорбции в эмиссионной системе.

Разработаны методы создания LAFE разных типов: ЖМИ на основе трековых мембран, пористого GaP, твердотельные многоострийные никелевые эмиттеры на основе трековых мембран, тонкоплёночные полимерные эмиттеры, плёночные нанокompозиты на основе углеродных наночастиц и полимеров. Проведены исследования их эмиссионных свойств.

Предложен метод определения температуры эмиссионных центров в нанокompозитных LAFE. Установлены корреляционные зависимости между током эмиссии, природой полимерной матрицы и температурой CNT.

Путём применения метода общего барьера, введения безразмерного поля f и общего барьерного фактора v^{GB} была получен набор уравнений для плотности эмиссионного тока. Уравнения выведены с представлениями полей различного вида (размерном, полуразмерном, безразмерном), написаны в системе международных единиц, обладают чёткой структурой и удобны для использования при обработке экспериментальных ВАХ, а также для 3D моделирования эмиссионной способности элементов LAFE различной формы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ТО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [1a] Коровин О.П., **Попов Е.О.**, Шредник В.Н., Каратецкий С.С. Многоострыйный жидкометаллический автоэлектронный эмиттер //Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – №. 8. – С. 39-44. **WoS_ID – WOS:000079872300022.**
- [2a] Popov E.O., Korovin O.P., Karatetskii S.S., Shrednik V.N. Emitter of electrons and ions for industrial and research accelerators //PACS2001. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. – IEEE, 2001. – Т. 3. – С. 2412-2414. **Sci_ID — 2-s2.0-0035569340.**
- [3a] **Попов Е.О.**, Popov S.O., Korovin O.P., The software for field emission investigation //Progress of Theoretical Physics Supplement. – 2000. – Т. 138. (The 5th International Conference on Computational Physics (ICCP5), 1999, Kanazawa, Japan, P1-04). <https://doi.org/10.1093/ptpsupp.138.xxv>
- [4a] **Попов Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Ershov M.V. Development of on-line emission parameters processing research technique of polymer-MWCNT emitters //25th International Vacuum Nanoelectronics Conference. – IEEE, 2012. – С. 306-307. **WoS_ID – WOS:000312875600115.**
- [5a] **Попов Е.О.**, Pashkevich A.A., Pozdnyakov A.O., Pozdnyakov O.F. MWNT polymer composite degradation under high emission current regime as revealed by mass spectrometry //2007 IEEE 20th International Vacuum Nanoelectronics Conference. – IEEE, 2007. – С. 28-29. **WoS_ID – WOS:000258094500014.**
- [6a] **Попов Е.О.**, Pozdnyakov A.O., Pozdnyakov O.F., Latypov Z.Z. Temperature evaluation of field emitting points for polymer-carbon nanotube composite using time-of-flight mass spectrometry //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2010. – Т. 28. – №. 2. – С. C2A28-C2A32. **WoS_ID – WOS:000276275100036.**
- [7a] **Попов Е. О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Fedichkin I.L., Romanov P.A. Mass-spectrum investigation of the phenomena accompanying the field electron emission //2014 27th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). – IEEE, 2014. – С. 125-126. **WoS_ID – WOS:000352795700053.**
- [8a] **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В., Романов П.А., Федичкин И.Л. Масс-спектрометрическая комплексная методика исследования полевых и термических свойств нанокпозиционных материалов //Наноматериалы и наноструктуры-XXI век. – 2016. – Т. 7. – №. 1. – С. 14-26. ISSN 2225-0999.
- [9a] **Попов Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A. Multichannel registration of field emission and accompanying processes of nanomaterials with on-line modeling //Materials Today: Proceedings. – 2018. – Т. 5. – №. 5. – С. 13800-13806. **WoS_ID – WOS:000435156700017.**
- [10a] **Попов Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Terukov E.I. Local current–voltage estimation and characteristization based on field emission image processing of large-area field emitters //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2018. – Т. 36. – №. 2. – С. 02C106-1-5. **WoS_ID – WOS:000428280500006.**
- [11a] **Попов Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Terukov E.I., Ryazanov R.M., Kitsyuk E.P. Comparison of macroscopic and microscopic emission characteristics of large area field emitters based on carbon nanotubes and graphene //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2020. – Т. 38. – №. 4. – С. 043203-1-10. **WoS_ID – WOS:000569109900006.**

- [12a] Юдкина Н.А., Колосько А.Г., Филиппов С.В., Попов Е.О. Компьютеризированное изучение однородности эмиссионных центров полевых нанокompозитных катодов с помощью автоэмиссионного микроскопа //Неделя науки СПбПУ. – 2015. – С. 200-202. ISBN 978-5-7422-5080-7 ISBN 978-5-7422-5079-1.
- [13a] **Попов Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V. Electrical field admissible values for the classical field emitter regime in the study of large area emitters //AIP Advances. – 2019. – Т. 9. – №. 1. – С. 015129-1–10. **WoS_ID – WOS:000457407600059.**
- [14a] Каратецкий С.С., Шредник В.Н., **Попов Е.О.**, Коровин О.П. Эмиттер заряженных частиц // Патент Российской Федерации №2143766. Приоритет от 8.02.99, БИ №36.
- [15a] Коровин О.П., **Попов Е.О.**, Каратецкий С.С., Шредник В.Н. Стабильность электронной эмиссии жидкометаллического многоострийного катода //Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – №. 9. – С. 75-80. **WoSJD – WOS:000087455600014.**
- [16a] **Попов Е.О.**, Popov S.O. Liquid metal multiple tip field emitter of large area //SID Conference Record of the International Display Research Conference. – 2002. – С. 759-760. **Sco_ID — 2-s2.0-0036459708.**
- [17a] Коровин О.П., Каратецкий С.С., **Попов Е.О.**, Шредник В.Н. Особенности взрывной эмиссии многоострийного жидкометаллического эмиттера //Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27. – №. 10. – С. 16-19. **WoS_ID – WOS:000168753500017.**
- [18a] Масалов С.А., Атращенко А.В., Улин В.П., **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В. Исследование электрофизических свойств поверхности пористого GaP (111) //Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42. – №. 22. – С. 39-48. **WoS_ID – WOS:000389917100016.**
- [19a] Масалов С.А., **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В., Улин В.П., Евтихий В.П., Атращенко А.В. Жидкометаллический полевой источник электронов на основе пористого GaP //Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – №. 9. – С. 1416-1422. **WoS_ID – WOS:000411117300024.**
- [20a] Gusinskii G.M., Golovko E.P., **Попов Е.О.**, Pashkevich A.A., Naidenov V.O., Lvova T.V. The multiple tip nickel cathode emission characteristics investigation //49th International Field Emission Symposium (IFES 04). – 2004. – С. 116.
- [21a] Ионов А.Н., **Попов Е.О.**, Светличный В.М., Пашкевич А.А. Влияние тонкого полимерного покрытия на автоэмиссионные свойства плоских металлических катодов //Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30. – №. 13. – С. 77-82. **WoS_ID – WOS:000223054700013.**
- [22a] Ionov A.N., **Попов Е.О.**, Svetlichnyi V.M., Nikolaeva M.N., Pashkevich A.A. Field emission from metal/polymer construction //Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films. – 2007. – Т. 39. – №. 2- 3. – С. 159-160. **WoS_ID – WOS:000244295600016.**
- [23a] **Попов Е.О.**, Pashkevich A.A., Pozdnyakov O.F., Latypov Z.Z., Some peculiarities of high emission current from CNT-polymer composite //Journal of Physics: Conf. Series. – IOP Publishing, 2008. – Т. 100. – №. 5. – С. 052090-1-5. **WoS_ID – WOS:000275655200186.**
- [24a] **Попов Е.О.**, Pashkevich A.A. The field emission in the alternative electric fields //Ultramicroscopy. – 2007. – Т. 107. – №. 9. – С. 838-843. **WoS_ID – WOS:000247770100025.**
- [25a] **Попов Е.О.**, Pashkevich A.A., Pozdnyakov A.O., Pozdnyakov O.F. Multi-walled nanotube polymer composite degradation under high emission current regime as revealed by mass spectrometry //Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 2008. – Т. 26. – №. 2. – С. 745-750. **WoS_ID – WOS:000254600600052.**

- [26a] Поздняков О.Ф., **Попов Е.О.**, Латыпов З.З., Поздняков А.О. Масс-спектрометрическая диагностика работы пленочного автоэлектронного эмиттера, изготовленного из композиции „полимер– углеродные нанотрубки “ //Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – №. 15. – С. 16-24. **WoS_ID – WOS:000269660100003.**
- [27a] Поздняков О.Ф., **Попов Е.О.**, Поздняков А.О. Сопоставление эффективности работы автоэлектронных пленочных эмиттеров, изготовленных из полимерных композитов с различными матрицами, наполненными углеродными нанотрубками //Письма в Журнал технической физики. – 2011. – Т. 37. – №. 5. – С. 49-56. **WoS_ID – WOS:000289735600008.**
- [28a] Колосько А.Г., Ершов М.В., Филиппов С.В., **Попов Е.О.** Эволюция характеристик полевого эмиттера на основе композита нитроцеллюлоза-углеродные нанотрубки //Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – №. 10. – С. 72-80. **WoS_ID – WOS:000320473700023.**
- [29a] Колосько А.Г., **Попов Е.О.**, Филиппов С.В., Романов П.А. Исследование статистического разброса автоэмиссионных параметров многоострийных катодов на основе композита полимер-углеродные нанотрубки //Письма в Журнал технической физики. – 2014. – Т. 40. – №. 10. – С. 65-72. **WoS_ID – WOS:000338231400022.**
- [30a] Kolosko A.G., **Popov E.O.**, Filippov S.V., Romanov P.A. Statistical dispersion of nanocomposite emission parameters //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2015. – Т. 33. – №. 3. – С. 03C104-1-6. **WoS_ID – WOS:000355011700004.**
- [31a] **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В., Смирнов И.Ю. Исследование с применением СК-анализа вольт-амперных характеристик нанокompозитных полевых эмиттеров на основе графена //Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – №. 7. – С. 1082-1088. **WoS_ID – WOS: 000406157900021.**
- [32a] **Popov E.O.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Fedichkin I.L., Romanov P.A. Mass-spectrum investigation of the phenomena accompanying field electron emission //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2015. – Т. 33. – №. 3. – С. 03C109-1-15. **WoS_ID – WOS:000355011700009.**
- [33a] **Popov E.O.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., Terukov E.I., Shchegolkov A.V., Tkachev A.G. Current-voltage characteristics of carbon nanostructured field emitters in different power supply modes //Applied Surface Science. – 2017. – Т. 424. – С. 239-244. **WoS_ID – WOS:000413651400016.**
- [34a] Kolosko A.G., Filippov S.V., Romanov P.A., **Popov E.O.**, Forbes R.G. Real-time implementation of the “orthodoxy test” for conformity of current–voltage characteristics with classical field electron emission theory //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2016. – Т. 34. – №. 4. – С. 041802-1-7. **WoS_ID – WOS:000389543500071.**
- [35a] **Popov E.O.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., de Assis T.A. Influence of the distribution of local field enhancement factors on the shape of the current-voltage characteristics of carbon-nanotube-based large-area emitters //Vacuum. – 2020. – Т. 173. – С. 109159-1-7. **WoS_ID – WOS:000518672200040.**
- [36a] **Popov E.O.**, Filippov S.V., Kolosko A.G., De Assis T.A. Experimental confirmation of the nearly power-law relation between macroscopic current and characteristic current density in carbon nanotube-based large-area field emitters //Journal of Applied Physics. – 2019. – Т. 126. – №. 4. – С. 044304-1-7. **WoS_ID – WOS:000478840600028.**

- [37a] **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Чумак М.А., Филиппов С.В. Десять способов определения площади полевой эмиссии //Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89. – №. 10. – С. 1615-1625. **WoS_ID – WOS:000490006800023.**
- [38a] **Роров Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V., Ponyaev S.A. Theoretical methods for definition of the emission area of multi-tip cathodes and their experimental validation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1400. – №. 7. – С. 077059.-1-6. **WoS_ID – WOS:000562316200289.**
- [39a] **Роров Е.О.**, Kolosko A.G., Filippov S.V. Experimental definition of k-power of pre-exponential voltage factor for LAFE //2018 31st International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). – IEEE, 2018. – С. 254-255. **WoS_ID – WOS:000454819000112.**
- [40a] **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В. Проверка применимости закона полевой эмиссии к исследованию многоострижных полевых эмиттеров методом анализа степени предэкспоненциального множителя напряжения //Письма в Журнал технической физики. – 2019. – Т. 45. – №. 18. – С. 13-16. **WoS_ID – WOS:000505156600017.**
- [41a] Forbes R.G., Kolosko A.G., Filippov S.V., **Попов Е.О.** (Invited) Reinvigorating our approach to field emission area extraction (because Murphy-Good plots are better than Fowler-Nordheim plots) //32nd International Vacuum Nanoelectronics Conf. & 12th International Vacuum Electron Sources Conf., Cincinnati, July Technical Digest. – 2019. – С. 23. DOI:10.13140/RG.2.2.32112.81927/2.
- [42a] **Попов Е.О.**, Колосько А.Г., Филиппов С.В. Тест на соответствие режиму холодной полевой эмиссии с применением приближений Элинсона-Шредника и Форбса-Дина (координаты Мерфи-Гуда) //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 17. – С. 6-9. **WoS_ID – WOS:000576572100002.**

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fursey G.N. Explosive Electron Emission of Carbon-Based Cathodes, and Applications, 529-546, (in Modern Developments in Vacuum Electron Sources, ed. G. Gaertner, W. Knapp, R.G. Forbes). – Springer, Cham, 2020. – 597 p.
- [2] Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия в вакуумной микроэлектронике, 162-189, (в книге Автоионная и автоэлектронная микроскопия и спектроскопия: история, достижения, современное состояние, перспективы, ред. А.Л. Суворова). – Москва: Академпринт, 2003. – 400 с.
- [3] Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. – Долгопрудный: Интеллект, 2011. – 703 с.
- [4] Cahay M., Zhu W., Jensen K.L., Forbes R.G., Fairchild S.B., Back T.C., Gruen G., Murray T., Harris J.R., Shiffler D.A. A platform to optimize the field emission properties of carbon-nanotube-based fibers //2016 29th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC). – IEEE, 2016. – С. 37-38.
- [5] Cahay M., Zhu W., Ludwick J., Jensen K.L., Forbes R.G., Fairchild S.B., Back T.C., Murray P.T., Harris J.R., Shiffler D.A. Optimizing the field emission properties of carbon-nanotube-based fibers //Nanotube Superfiber Materials. – William Andrew Publishing, 2019. – С. 511-539. A volume in Micro and Nano Technologies, (ed. M.J. Schulz, V. Shanov, Z. Yin, M. Cahay), Elsevier Inc. – 2019. 972 p.
- [6] Kopelvski M.M., Galeazzo E., Peres H.E.M., Ramirez-Fernandez F.J., Silva D.A.C., and Dantas M.O.S. Characterization system based on image mapping for field emission devices //Measurement. – 2016. – Т. 93. – С. 208-214.

- [7] Kopelvski M.M., Ramirez-Fernandez F.J., Galeazzo E., Dantas M.O.S., and Peres H.E.M. Potentialities of a New Dedicated System for Real Time Field Emission Devices Characterization: A Case Study //2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT). – IEEE, 2019. – C. 1-5 (5pp).
- [8] Dantas M.O.S., Criado D., Zúñiga A., Silva W.A.A., Galeazzo E., Peres H.E.M. and Kopelvski M.M. ZnO Nanowire-Based Field Emission Devices Through a Microelectronic Compatible Route //J. of Integrated Circuits and Systems. – 2020. – T. 15. – №. 1. – C. 1-6.
- [9] Chubenko O., Baturin S.S., Kovi K.K., Sumant A.V., and Baryshev S.V. Locally resolved electron emission area and unified view of field emission from ultrananocrystalline diamond films //ACS applied materials & interfaces. – 2017. – T. 9. – №. 38. – C. 33229-33237.
- [10] Posos T.Y., Fairchild S.B., Park J., and Baryshev S.V. Field emission microscopy of carbon nanotube fibers: Evaluating and interpreting spatial emission //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2020. – T. 38. – №. 2. – C. 024006-1-9.
- [11] Wu L., Pei X., Cheng Y., Sun W., Wang Y., Dong M., Xi Z. and Sun J. A field emission performance test device for continuous adjustment of the electrode spacing in the vacuum system //Measurement Science and Technology. – 2018. – T. 30. – №. 1. – C. 015015 (7pp).
- [12] Kyritsakis A., Djurabekova F. A general computational method for electron emission and thermal effects in field emitting nanotips //Computational Materials Science. – 2017. – T. 128. – C. 15-21.
- [13] Zhang P., Park J., Fairchild S.B., Lockwood N.P., Lau Y.Y., Ferguson J., Back T. Temperature comparison of looped and vertical carbon nanotube fibers during field emission //Applied Sciences. – 2018. – T. 8. – №. 7. – C. 1175-1-12.
- [14] Forbes R.G. Use of energy- space diagrams in free- electron models of field electron emission //Surface and Interface Analysis. – 2004. – T. 36. – №. 5- 6. – C. 395-401.
- [15] Liang Shi-Dong. Quantum tunneling and field electron emission theories. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2014. – 387 p.
- [16] Forbes R.G., Deane J.H.B. Reformulation of the standard theory of Fowler–Nordheim tunnelling and cold field electron emission //Proceedings of the Royal Society A: Math., Physical and Engineering Sciences. – 2007. – T. 463. – №. 2087. – C. 2907-2927.
- [17] Forbes R.G. Development of a simple quantitative test for lack of field emission orthodoxy //Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2013. – T. 469. – №. 2158. – C. 20130271-1-14.
- [18] Forbes R.G., Comments on the continuing widespread and unnecessary use of a defective emission equation in field emission related literature //Journal of Applied Physics. – 2019. – T. 126. – №. 21. – C. 210901-1-14.
- [19] Murphy E.L., Good J.R.H. Thermionic emission, field emission, and the transition region //Physical review. – 1956. – T. 102. – №. 6. – C. 1464-1473.
- [20] Modinos A. Field, thermionic, and secondary electron emission spectroscopy. – Springer Science, NY, 1984. – 375 p.
- [21] Dyke W. P., Trolan J. K. Field emission: large current densities, space charge, and the vacuum arc //Physical Review. – 1953. – T. 89. – №. 4. – C. 799-808.
- [22] Фурсей Г.Н. Автоэлектронная эмиссия. – СПб: Изд. «Лань», 2012. – 320 с.
- [23] Шредник В.Н. Теория автоэлектронной эмиссии металлов, 317-321, в Ненакаливаемые катоды, (ред. Елинсон М.И.). – М.: Сов. радио, 1974. – 336 с.
- [24] Musa I., Munindrasdasa D.A.I., Amaratunga G.A.J., Eccleston W. Ultra-low-threshold field emission from conjugated polymers //Nature. – 1998. – T. 395. – №6700. – C. 362-365.

- [25] Milne W.I., Teo K.B.K., Minoux E., Groening O., Gangloff L., Hudanski L., Schnell J.-P., Dieumegard D., Peauger F., Bu I.Y.Y., Bell M.S., Legagneux P., Hasko G., and Amaratunga G.A.J. Aligned carbon nanotubes/fibers for applications in vacuum microwave amplifiers //Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 2006. – Т. 24. – №. 1. – С. 345-348.
- [26] Cole M.T., Nakamoto M., and Milne W.I. Field Emission Displays (FEDs) and Surface-Conduction Electron-Emitter Displays (SEDs), Handbook of Digital Imaging, John Wiley & Sons, Ltd. – 2015. – С. 1-28.
- [27] Parmee R.J., Collins C.M., Milne W.I., and Cole M.T. X-ray generation using carbon nanotubes //Nano Convergence. – 2015. – Т. 2. – №. 1. – С. 1-27.
- [28] Fursey G.N., Polyakov M.A., Begidov A.A., Zakirov I.I., Podymsky A.A., Yakub A.A. A new class of portable X-ray apparatuses based on carbon nanocluster cathodes //Journal of Communications Technology and Electronics. – 2017. – Т. 62. – №. 8. – С. 882-885.
- [29] Фурсей Г.Н., Поляков М.А., Баграев Н.Т., Закиров И.И., Нашёкин А.В., Бочаров В.Н. Низкопороговая полевая эмиссия из углеродных структур //Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2019. – №. 9. – С. 28-39.
- [30] Kawasaki M., He Z., Gotoh Y., Tsuji H., Ishikawa J. Development of in situ analyzer of field-emission devices //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2010. – Т. 28. – №. 2. – С. C2A77-C2A82.
- [31] Persaud A. Analysis of slope-intercept plots for arrays of electron field emitters //Journal of Applied Physics. – 2013. – Т. 114. – №. 15. – С. 154301-1-6.
- [32] Gomer R. Field Emission and Field Ionization. – Harvard University Press, Cambridge, MA, 1961. – 195 p.
- [33] de Assis T.A., Dall’Agnol F.F., Andrade R.F.S. The consequences of dependence between the formal area efficiency and the macroscopic electric field on linearity behavior in Fowler–Nordheim plots //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2016. – Т. 49. – №. 35. – С. 355301 (11p).
- [34] A. de Assis T., P. de Castro C. Extracting scaled barrier field from experiments with conducting large-area field emitters: Considerations by inclusion of the dependence between area of emission and the applied field //Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena. – 2017. – Т. 35. – №. 5. – С. 052201-1-7.
- [35] Forbes R. G. Call for experimental test of a revised mathematical form for empirical field emission current-voltage characteristics //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 92. – №. 19. – С. 193105.