

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Московский физико-технический институт
(государственный университет)

На правах рукописи

УДК 537.533.2

ЛЕЙЧЕНКО АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНАРНЫХ
АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

01.04.04 – физическая электроника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
д.ф.-м.н., проф. Шешин Е.П.

Долгопрудный – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Шешин Евгений Павлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Образцов Александр Николаевич,
зав. лаб. перспективных углеродных материалов
кафедры физики полимеров и кристаллов
физического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова

доктор технических наук,
профессор Тишин Юрий Иванович,
генеральный директор ООО «Юник Ай Сиз»

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт общей физики им. А.М. Прохорова
РАН

Защита диссертации состоится «13» октября 2010 года в 15 ч. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.156.01 при Московском физико-техническом институте по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9.

Отзывы направлять по адресу: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, МФТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан «___» сентября 2010 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
к. ф.-м. н, доцент

А.С. Батурин

Актуальность темы

Создание, исследование и применение автоэмиссионных катодов (АЭК) является одним из актуальных направлений современной науки и техники. В последнее время значительный интерес привлекают исследования автоэлектронной эмиссии из новых типов углеродных материалов. Отличительной особенностью углерода является его высокая устойчивость к воздействию разрушающих факторов эмиссионного процесса, а также возможность создания различных структур на его основе с уникальными эмиссионными свойствами.

С практической точки зрения особо актуальным является создание плоских автоэмиссионных источников света и дисплейных экранов. Для таких применений необходимо формировать большие массивы автоэмиссионных катодов (от нескольких кв. см до нескольких десятков, а то и сотен кв. см). Оптимизация параметров таких автокатодов требует понимания фундаментальных закономерностей их работы. При этом для создания катодных массивов большой площади необходимо учитывать не только параметры отдельного катода, но и взаимодействие элементов массива между собой.

Материал автокатаода определяет его эмиссионные характеристики и свойства конечного прибора. В качестве АЭК были опробованы различные типы углеродных волокон, пиролитические графиты, мелкопористые графиты и другие углеродные материалы. Практически сразу с момента обнаружения нанотрубок в 1991 году было выявлено, что они обладают уникальными эмиссионными свойствами. Автокатоды на их основе получили широкое распространение. Таким образом, к настоящему времени исследован достаточно широкий спектр углеродных материалов для использования в качестве автокатодов. Однако для изготовления вакуумных приборов на их основе необходимо решить ряд задач, а именно, формирования планарного катода определенной формы и обеспечения достаточной повторяемости

геометрических параметров, изготовления катодных массивов большой площади, получения развитой эмитирующей поверхности планарного катода и др.

Преодолеть вышеописанные проблемы можно, применив для изготовления АЭК материал с планарной структурированностью, способный обеспечить стабильную эмиссию с торцевой поверхности и устойчивый к воздействию остаточных газов. При этом он должен соответствовать технологическим требованиям, предъявляемым к вакуумным материалам и приборам, иметь высокую шероховатость поверхности, на которой происходило бы существенное усиление поля, а также должен существовать технологичный способ формирования из этого материала катодов большой площади с высокой повторяемостью эмиссионных свойств.

Одним из материалов, удовлетворяющих данным требованиям по структурным свойствам, является терморасширенный графит (ТРГ).

Целью работы являлось исследование возможностей применения терморасширенного графита в новом конструктивном решении – в качестве латерального автоэмиссионного катода – и изучение его эмиссионных свойств.

В работе решались следующие основные научно-технические задачи:

- определение физических особенностей процессов лазерной резки фольги из ТРГ с целью обеспечения контролируемого процесса изготовления катодов со стабильными и повторяемыми эмиссионными характеристиками;
- проведение сравнительного экспериментального исследования эмиссии электронов из автокатодов, прошедших различную предварительную обработку;
- определение предельно допустимых эмиссионных параметров катодов из ТРГ и пороговых напряженностей электрического поля, необходимых для работы катода;

- разработка катодно-модуляторных узлов с латеральным катодом из ТРГ и моделирование их электронно-оптических свойств.

Научная новизна.

В работе впервые предложен и апробирован новый метод изготовления автокатодов, а именно, — формирование катодных срезов заданной формы в планарном углеродном материале импульсным лазерным излучением. Предложенный метод обеспечивает стабилизацию эмиссионных характеристик при работе автокатода в условиях технического вакуума.

Впервые экспериментально продемонстрирована зависимость параметров автокатодов на основе фольги из ТРГ от способа предварительной обработки (механическая, лазерное излучение).

Для предварительной оценки качества изготовления автоэмиссионных катодов впервые применена визуализация областей катода с максимальным усилением электрического поля у поверхности при помощи коронного разряда на воздухе.

Разработана электронно-оптическая система и проведено компьютерное моделирование зависимости характеристик эмиссионного процесса от геометрических параметров системы. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Слоистая структура фольги из ТРГ с преимущественной ориентацией базисной плоскости кристаллической структуры графита параллельно плоскости прокатки обеспечивает формирование на ее срезе лезвийной структуры, обеспечивающей усиление электрического поля на микронеровностях поверхности.
2. Поверхностный характер и локальность лазерного воздействия приводят к созданию на поверхности автоэмиссионного катода слоя материала с измененным по отношению к основной массе структурно-фазовым

составом (графитация) и увеличению открытой пористости, что приводит к формированию развитой эмиссионной поверхности с характерным размером шероховатости 100 нм.

3. Краевой эффект у катода в электронно-оптической системе латеральной конструкции с автоэмиссионным катодом в форме круглого отверстия и управляющим электродом, расположенным под отверстием, обеспечивает отклонение траекторий электронов к центру системы, что приводит к формированию локализованного автоэмиссионного изображения на аноде.

Практическая значимость работы заключается в применимости полученных результатов при разработке приборов эмиссионной электроники. Автокатоды в виде массивов отверстий в фольге из ТРГ позволяют создать на их основе различные устройства, для которых необходимы «засветка» электронами большой площади анода и компактность — плоские источники света, матричные дисплейные экраны. Также могут быть созданы электронные пушки для различных электровакуумных приборов, в частности, для рентгеновских трубок.

В процессе формирования автоэмиссионных катодов с помощью лазерной резки эмиссионная поверхность модифицируется, в результате чего существенно повышаются эмиссионные характеристики и долговечность автокатодов, что ведет к улучшению параметров конечных приборов на их основе, а именно, снижению рабочих напряжений, увеличению максимальной мощности, долговечности.

Коронный разряд на воздухе позволяет визуализировать области автоэмиссионного катода с максимальным усилением электрического поля и проводить анализ качества автоэмиссионного катода вне вакуумных условий.

На основе разработанных катодов были созданы прототипы матричного дисплея и плоского источника света триодной конструкции.

Внедрение результатов работы: научные подходы и научные результаты диссертации могут быть использованы в ведущих российских научных организациях, занимающихся теоретическими и экспериментальными работами в области вакуумной и автоэмиссионной электроники: Институте радиоэлектроники Российской академии наук, Научно-исследовательском институте «Платан», Научно-исследовательском институте физических проблем им. Лукина, Институте общей физики Российской академии наук им. А.М. Прохорова, Научно-исследовательском институте «Волга», Научно-исследовательском институте «Исток».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 21 научно-технической конференции:

- i. 5-я международная конференция «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Москва, 2006
- ii. Joint 19th International Vacuum Nanoelectronics Conference and 50th International Field Emission Symposium (Объединенные международные 19-я конференция по вакуумной наноэлектронике и 50-й симпозиум по полевой эмиссии). Гуйлин, Китай, 2006
- iii. 16-я -18-я Международная научно-техническая конференция «Современное телевидение», Москва, 2008-2010
- iv. ICHMS'07 и '09, Судак, 2007-2009
- v. International Display Research Conference (Международная конференция по исследованиям в области дисплеев), Москва, 2007
- vi. 47-я - 54-я научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Долгопрудный, 2004 – 2009
- vii. конференция «Нанотехнологии – производству 2007». Фрязино, 2007
- viii. XIV научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», Москва, МГИЭМ, 2007

- ix. 51nd International Field Emission Symposium (50-й международный симпозиум по полевой эмиссии), 2008
- x. XVIII Международное совещание «Радиационная физика твердого тела», Севастополь, 2008
- xi. International Vacuum Electron Source Conference (Международная конференция по вакуумным источникам электронов), 2008

Основные результаты опубликованы в 4 статьях в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, и 9 тезисах международных конференций.

Личный вклад автора

Автором спроектирована и собрана экспериментальная установка, проведены экспериментальные исследования и численное моделирование свойств систем и их отдельных элементов, проведены расчеты и изготовление систем с автоэмиссионными катодами. Постановка задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем и соавторами опубликованных работ при непосредственном участии соискателя.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (из 157 наименований) и приложения. Диссертация изложена на 138 листах машинописного текста, включает 43 рисунка и 3 таблицы.

Во введении к диссертационной работе сформулированы актуальность выбранной темы, описаны основные цели, задачи и научная новизна диссертационной работы.

Первая глава посвящена анализу литературных данных о современных материалах и методиках изготовления автоэмиссионных катодов. Наиболее популярным и активно разрабатываемым приложением автоэмиссионных катодов является создание на их основе автоэмиссионных дисплеев (АЭД).

Данная технология основана на использовании на задней плоскости АЭД панели большого числа автоэмиссионных источников электронов, обеспечивающих бомбардировку участков люминесцентного экрана, соответствующих конкретным источникам электронов. Несмотря на простоту концепции такой конструкции и ее технологическую реализуемость, имеются многочисленные сложности в создании коммерческой технологии изготовления таких приборов. В главе рассматриваются имеющиеся проблемы и обсуждаются пути их преодоления.

Основой АЭД является автоэмиссионный катод. Его структура должна обеспечивать эмиссию электронов при достаточно малых макроскопических электрических полях (обычно в диапазоне 1 – 20 В/мкм) и высокой плотности тока (обычно от 10 до 100 мА/см²), чтобы обеспечить достаточную яркость свечения люминесцентного покрытия. Для успешного применения в АЭД он должен формироваться достаточно легко, точно и равномерно на всей активной поверхности дисплея и быть изготовленным из вакуумно-совместимого материала.

Последнее положение является очень важным, так как определение вакуумно-совместимый означает не только способность работать в условиях вакуума, но и переносить технологические процессы изготовления откачанного прибора (повышенные температуры), а также не ухудшать вакуум и не деградировать при долговременной работе дисплея. С подобными проблемами уже сталкивались производители при разработке электронных микроскопов с применением электронных пушек на основе автоэмиссионных катодов. Наконец, материал катода должен быть механически и химически совместим с контактными дорожками и другими соседствующими структурами прибора. Это включает соответствие коэффициентов температурного расширения для предотвращения отлипания, растрескивания или создания избыточных внутренних напряжений в ходе обработки прибора.

Для автоэмиссионных катодов являются важными такие параметры, как пороговая напряженность электрического поля (напряженность, необходимая

для включения эмиссии определенного тока или его плотности), плотность эмиссионных центров (число эмиссионных центров на единице поверхности), временная стабильность эмиссионных центров и изменение этих параметров в зависимости от области образца.

В главе проводится обзор различных типов автоэмиссионных катодов: микроострия, композиты, тонкие пленки, алмаз и алмазоподобные пленки, графит и графитовые пасты, полимеры, углеродные волокна и нанотрубки. Рассматривается технология изготовления катодов: выбор подложки, формирование электродов катодного контакта и затвора, резистивных слоев, изоляции.

Также проводится сравнение конструкции Спиндта с альтернативными триодными и тетродными конструкциями: основанными на тонкопленочных краевых эмиттерах, поверхностной эмиссии, поверхностной проводимости. Особое внимание уделяется конструкции на основе тонкопленочных краевых эмиттеров (латеральной), она представляется более выгодной, так как позволяет использовать для изготовления приборов стандартную технологию осаждения тонких пленок, что делает производство более экономичным и легко контролируемым. Важным преимуществом латеральных конструкций является существенное увеличение площади рабочей поверхности катода, экранировка рабочей поверхности катода от воздействия ионов остаточных газов, возможность прецизионного выставления субмикронных расстояний между катодом и управляющим электродом.

Далее рассматривается вопрос применения в латеральной конструкции наиболее популярного в настоящее время типа материалов автокатаода – структур на основе углерода.

Автоэмиссионные свойства углеродных материалов обладают рядом закономерностей:

- материалы с анизотропией физико-химических свойств обладают наилучшими эмиссионными свойствами;

- эмиссионные способности улучшаются с ростом температуры термической обработки.

Эти закономерности эмиссионных свойств углеродных материалов дают основания для рассмотрения термически расширенного графита и композиционных материалов на основе него в качестве материала автоэммиттера.

Изучение процесса изготовления и получаемой в итоге структуры фольги из ТРГ показало, что данный материал удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к материалам, используемым для изготовления автоэмиссионных катодов. Она обладает кристаллитной структурой, причём вследствие технологических особенностей производства, кристаллиты в ней обладают высокой степенью упорядоченности. Кроме того, фольга обладает ярко выраженной анизотропией физических свойств. Наличие пор у графитовой фольги может быть использовано для улучшения её эмиссионных свойств, путём внедрения в поры материалов, понижающих работу выхода электронов.

Вторая глава посвящена выбору и отработке методики исследования свойств автоэмиссионного катода.

Анализ эмиссионных свойств катода удобно проводить при помощи теории Фаулера-Нордгейма на основе связи напряженности электрического поля у поверхности катода с плотностью эмиссионного тока. Обычно для исследования автоэмиссионных свойств применяют диодный режим работы катода. Однако на практике приходится сталкиваться с более сложными конструкциями. В главе демонстрируется применение принципа суперпозиции полей для расчета эмиссионных свойств катода в триодной конструкции:

$$E = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2,$$

где β_i - форм-фактор катода относительно i -го электрода, U_i - напряжение на i -м электроде. Так как $j = f(E)$, то, используя полученные экспериментально в сериях анодно-сеточных характеристик соотношения между напряжениями на электродах при определенном уровне тока, можно найти соотношение между β_1

и β_2 , что позволяет избавиться от одного из параметров и использовать уравнение Фаулера-Нордгейма для определения второго параметра, а также площади эмитирующей поверхности катода. Следует отметить, что данный метод применим в конструкциях, где взаимное влияние потенциалов на вытягивающих электродах незначительно.

Приводится обоснование выбора методики проведения долговременных автоэмиссионных испытаний с поддержанием стабильного уровня тока катода. Основными предпосылками являются нестабильность автоэмиссионного тока и высокая крутизна вольт-амперной характеристики. Описывается стенд (рис. 1), позволяющий проводить долговременные испытания автоэмиссионных характеристик катодов в диодном и триодном режимах в автоматическом режиме. Для установки и контроля параметров эксперимента используется специализированная программа.

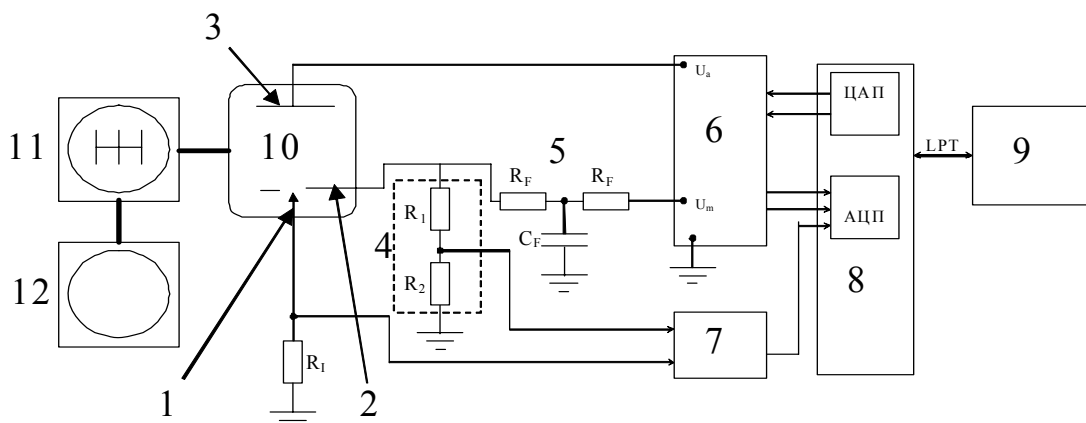


Рис. 1. Схема измерительного стенда: 1 – катод, 2 – модулятор, 3 – анод, 4 – делитель напряжения 1:1000, 5 – высокочастотный фильтр, 6 – блок питания, 7 – предварительный усилитель с защитой, 8 – LTC крейт, 9 – управляющий компьютер, 10 – вакуумная камера, 11 – турбомолекулярный насос, 12 – форвакуумный насос

Также в главе приводятся такие методики визуализации автоэмиссионных центров и контроля качества катодов, как растровая электронная микроскопия, анализ автоэлектронного изображения катода, коронный разряд в воздушной среде.

Определяющую роль в формировании распределения напряженности электрического поля у поверхности автоэмиссионного катода играет его топография. Для исследования эмиссионной поверхности РЭМ является оптимальной методикой. С его помощью можно исследовать поверхность катода с разрешением менее 100 ангстрем.

Люминесцентный экран, расположенный на пути электронного потока, является простым и эффективным способом визуализации распределения плотности тока в этом потоке. Так как в автоэлектронной эмиссии плотность тока определяется форм-фактором, то в случае параллельно расположенных плоскостей катода и люминесцентного экрана (анода) появляется возможность оценки распределения эмиссионных центров по поверхности катодной плоскости и, соответственно, контроля качества изготовления прибора. В данной работе это особенно важно, так как качество и размер автоэмиссионного изображения отдельного катода определяет качество и разрешение конечного прибора – массива АЭЖ.

На ток коронного разряда существенное влияние оказывает напряженность электрического поля у поверхности электрода, соответственно, корона будет наблюдаться в области катода с наибольшим форм-фактором, также следует заметить, что чем больше область короны, тем больше площадь катода с эмиссионными центрами, имеющими близкие значения форм-фактора. Для проведения эксперимента с коронным разрядом не требуется вакуум и сложная аппаратура, но таким способом можно легко контролировать качество изготовления автоэмиссионного катода.

Третья глава посвящена исследованию особенностей структуры терморасширенного графита и фольги из ТРГ. Проводится выбор материала для изготовления автокатода. Описывается способ формирования катодной матрицы из фольги ТРГ с помощью импульсного лазерного излучения.

Необходимость предварительной обработки фольги из ТРГ для формирования эмиссионной поверхности обусловлена тем, что поверхность фольги после прокатки является гладкой и обладает малым коэффициентом

усиления электрического поля. Даже механическая обработка существенно увеличивает коэффициент усиления и позволяет наблюдать автоэлектронную эмиссию при относительно небольших напряжениях на аноде (порядка 1 кВ). Как было выяснено в ходе предварительных испытаний, для формирования эффективных автоэммиттеров на поверхности фольги ТРГ не подходят способы механической обработки. Необходимо использовать метод, который бы позволил освободить структуру ТРГ без механической деформации, поэтому механические методы обработки не достаточно эффективны. В качестве такого метода предлагается лазерная обработка.

Поверхностный характер и локальность лазерного воздействия позволяет:

- создать на поверхности изделия слой материала с изменённым по отношению к основной массе структурно-фазовым составом (температуры более 3000 К в облучаемой области обеспечивают графитацию материала);
- на промежуточной стадии изготовления изделий изменить пористую структуру материала (увеличить открытую пористость).

Проведен анализ зависимости области обработки материала от параметров лазерного излучения. Было выяснено, что при длительности лазерного импульса менее 1 мкс позволяют добиться размеров области изменения структурного состава материала меньше 50 микрон.

В экспериментах по выбору режима лазерной обработки использовались две лазерные установки: «Квант-15» и «МЛП-2» (производитель «ЭСТО», г. Зеленоград). С помощью растровой электронной микроскопии была исследована топография эмиссионной поверхности после обработки в различных режимах (рис. 2).

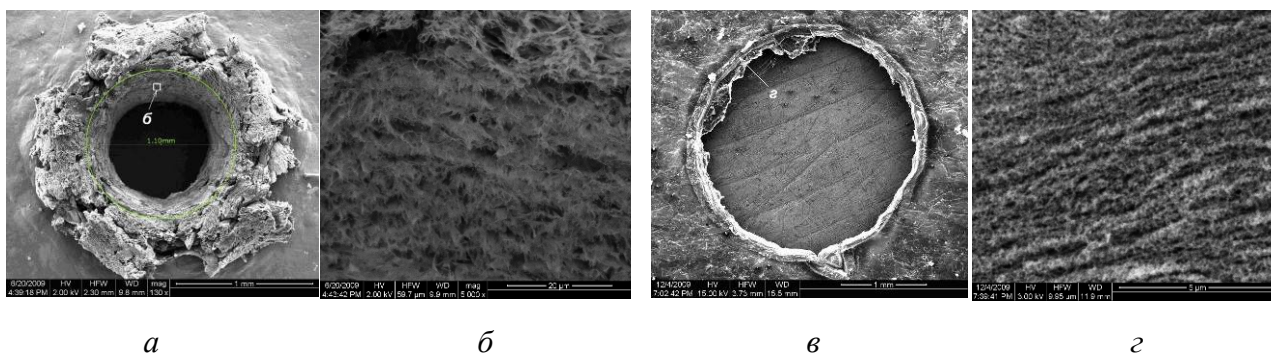


Рис. 2. Отверстия в фольге из ТРГ: *а, б* - получено воздействием одиночного лазерного импульса на установке «Квант-15» (энергия импульса – 10 Вт, длительность импульса 4 мс), *в, г* – получено многопроходной методикой на установке «МЛП-2» (энергия импульса 0,5 мДж, длительность импульса – 80 нс, частота повторения – 20 кГц)

Было обнаружено, что лазерная обработка приводит к существенному изменению микрогеометрии обрабатываемой поверхности с образованием микронеровностей с характерным размером 20 – 60 нм, равномерно распределенных по поверхности катода и ориентированных перпендикулярно плоскости катода. В случае обработки длительным импульсом лазерного излучения происходит изменение макрогеометрии катода (рис. 2,*а*), что усложняет применение его в латеральной конструкции.

Анализ автоэмиссионного изображения матрицы из катодных отверстий 5x3 показал эффективность эмиссии с краев этих отверстий. Для более детального исследования эмиссионных свойств катода было рассмотрено отдельное отверстие. Конструкция пробника представляла собой диод, образуемый катодом и модулятором разрабатываемой конструкции (рис. 4):

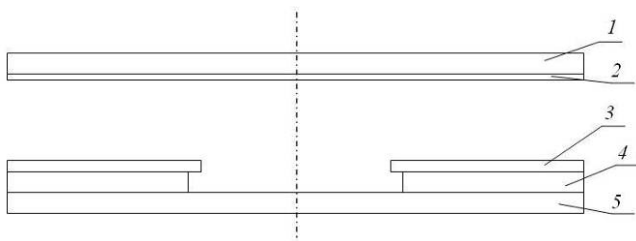


Рис. 4. Автоэмиссионный источник электронов на основе тонкопленочного краевого эмиттера: 1 – анод (стекло с ИТО слоем), 2 – слой люминофора, 3 – катод (ТРГ), 4 – изолятор, 5 – модулятор

на стеклянной подложке с проводящим покрытием, которое служило анодом (элемент 5), располагалась пластинка слюды (элемент 4) толщиной 30 мкм с отверстием диаметра 1 мм, на пластинку крепился катод (элемент 3), отверстие которого располагалось соосно с отверстием в слюде.

Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились в вакуумной камере при давлении остаточных газов 10^{-6} торр. Вольт-амперные характеристики катодов из ТРГ, а также эволюция напряжения на аноде в ходе долговременной наработки при токе катода 20 мкА представлены на рисунке 5. Анализ ВАХ показал, что пороговая напряженность электрического поля для данной конструкции $E[I = 1 \text{ мкА}] \approx 4..6 \text{ В/мкм}$. Оцененный на основании вольт-амперных характеристик, характерный размер неровностей составляет порядка 30 нм. Диод обладал высокой крутизной ВАХ $\Delta I/\Delta U > 3 \cdot 10^5 \text{ Ом}^{-1}$ и низкими рабочими напряжениями $U_a < 700 \text{ В}$ при токе катода 50 мкА.

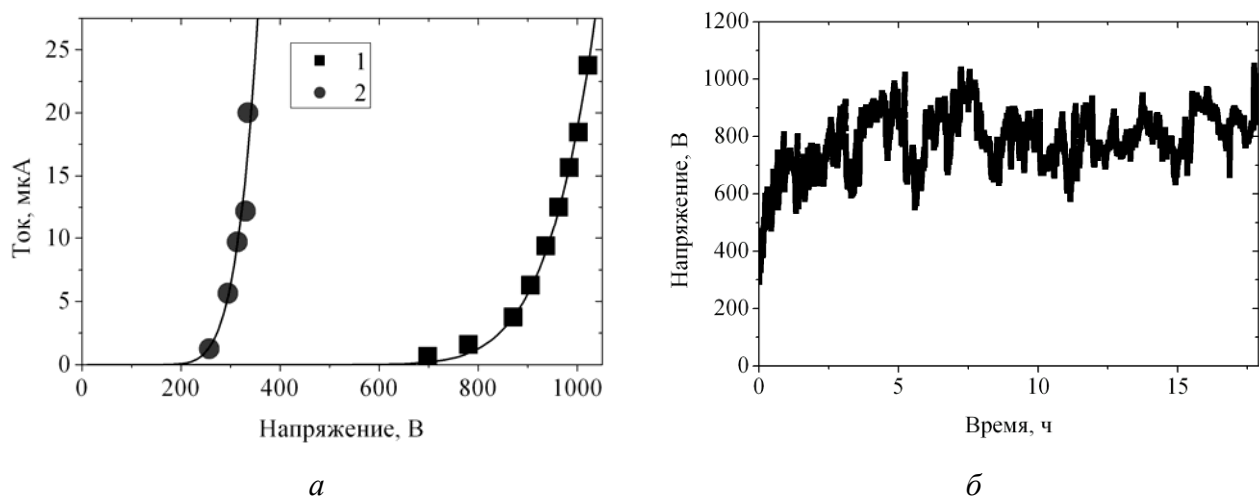


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики (а) латеральных катодов после механической (1) и лазерной (2) обработки, эволюция вытягивающего напряжения при поддержании тока катода 20 мкА

Сравнение автоэмиссионных характеристик катодов, изготовленных путем механической и лазерной обработки, показало такие преимущества лазерной обработки, как на порядок больший форм-фактор катода (40 мкм^{-1}), меньшие рабочие напряжения прибора и долговременную стабильность.

Четвертая глава посвящена компьютерному моделированию параметров разрабатываемой конструкции (рис. 4), обеспечивающих увеличенную крутизну анодно-сеточных характеристик триода, пониженный токоперехват на управляющем электроде, высокую локализацию автоэмиссионного изображения отдельного катода. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics с применением метода конечных элементов.

При моделировании было обнаружено, что рабочие напряжения на модуляторе для поддержания заданного уровня тока изменяются обратно пропорционально диаметру катодного отверстия. Также при рассмотрении токопрохождения наблюдался полный токоперехват на модуляторе при диаметре катодного отверстия менее величины зазора катод-анод. Обнаруженные закономерности объясняются тем, что с уменьшением диаметра отверстия уменьшается и проникновение поля вглубь него, и взаимное дополнение вытягивающих электродов в эмиссионном процессе нейтрализуется.

Анализ результатов моделирования показал, что необходимые параметры электронно-оптической системы, сформулированные ранее, достигаются при следующих геометрических параметрах: расстояние катод-модулятор 120 мкм, диаметр катодного отверстия 5 мм при напряжении на аноде 2000 В, расстоянии катод-анод 2 мм и толщине катода 50 мкм.

Анализ траекторий электронов также показал, что использование катода в виде круглого отверстия приводит к уменьшению автоэмиссионного изображения за счет следующих особенностей:

- начальный отрезок пути электроны летят в направлении центра системы, таким образом, расстояние от оси системы до электрона $r = |\vec{R}_0 + \vec{t}| < \max[R_0, t]$, где R_0 - начальный радиус-вектор от оси симметрии системы до электрона, t – смещение электрона в плоскости анода;
- за счет неоднородности электрического поля у края катода, противоположного месту эмиссии электрона, происходит отклонение траекторий электронов к аноду.

Следует отметить тот факт, что предложенная конструкция электронно-оптической системы может применяться в качестве источника вторичных электронов. Если материал модулятора обладает высоким коэффициентом вторичной эмиссии (>1), то ток анода будет не меньше автоэмиссионного тока катода, а за счет конфигурации электрического поля пучок электронов, эмитированных с поверхности модулятора, будет фокусироваться на аноде

Изготовленный на основании определенных в моделировании параметров триод во время испытаний показал низкие управляющие напряжения (<400 В), высокий коэффициент токопрохождения – более 0,95 и размер эмиссионного изображения 3 мм (Рис. 6).

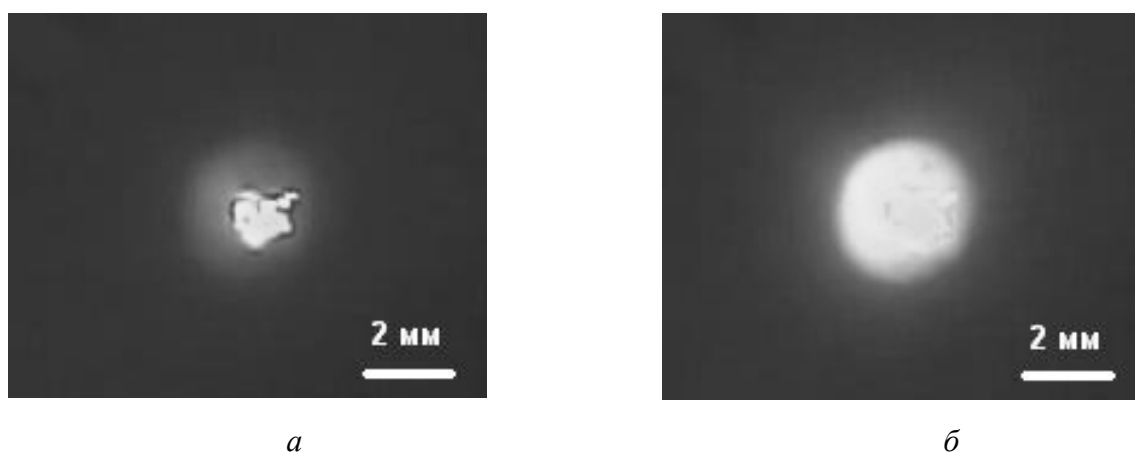


Рис. 6. Автоэмиссионное изображение катода при токе 10 мкА (а) и 50 мкА (б)

В конце главы предложены пути дальнейшего развития автоэмиссионных источников электронов на основе углеродных материалов.

В **заключении** сформулированы результаты диссертационной работы.

Основные результаты диссертационной работы:

1. На основе фольги из ТРГ создан автокатод, эмиссионной поверхностью которого является срез. Проведено исследование его эмиссионных свойств.
2. Разработана методика формирования эмиссионной поверхности на срезе планарных углеродных материалов с помощью лазерного излучения ИК диапазона. Аналитически рассчитан и реализован на практике режим, позволяющий формировать на срезе обрабатываемого материала эмиссионную поверхность с высоким усилением электрического поля за счет развитой микрогеометрии.
3. Реализована методика визуализация областей автоэмиссионного катода с максимальным усилением электрического поля на основе коронного разряда на воздухе.
4. Проведено компьютерное моделирование электронно-оптической системы катодолумinesцентного источника света триодной конструкции с латеральным автоэмиссионным катодом. Определены и экспериментально реализованы конфигурации электронно-оптических систем с увеличенной крутизной анодно-сеточных характеристик, пониженным токоперехватом на управляющем электроде и большей локализацией автоэмиссионного изображения катода. Результаты моделирования подтверждены экспериментально.
5. Разработана комплексная методика измерений эмиссионных характеристик электронно-оптических систем триодной конструкции, позволяющая определять эмиссионные параметры катодов при работе в триодной конструкции: форм-факторы систем катод-модулятор и катод-анод, площадь эффективной эмитирующей поверхности.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. **Leychenko A.S.**, Starikov P.A., Sheshin E.P. Carbon foil working surface treatment influence on the field emission characteristics // ICHMS, 2007, стр. 780-781.
2. **Лейченко А.С.**, Стариков П.А., Шешин Е.П. Источник свободных электронов на основе автоэмиссионного катода из углеродной фольги // Материалы XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника», Москва, МГИЭМ, 2007, стр. 228-231.
3. **Leychenko A.S.**, Starikov P.A., Sheshin E.P. Cathodoluminescent light source with carbon foil field emission cathode // IVESC, 2008
4. **Leychenko A.S.**, Starikov P.A., Sheshin E.P. Planar under-gate electron source with fiber field emission cathode // IFES, 2008.
5. Грознов С.И., **Лейченко А.С.**, Шешин Е.П., Щука А.А. Плоские дисплейные экраны на основе автоэмиссионных катодов // Chip News, 2008, №7 (131), стр. 21-25.
6. Ерошкин П.А., **Лейченко А.С.**, Стариков П.А. Коронный разряд как метод визуализации автоэмиссионных центров // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Москва-Долгопрудный, 2008, стр. 7.
7. **Лейченко А.С.**, Стариков П.А., Шешин Е.П. Использование автокатаода из углеродной фольги в катодолюминесцентном источнике света // Труды XVIII международного совещания «Радиационная физика твердого тела», Москва, 2008.
8. **Лейченко А.С.**, Лупарев Н.В., Стариков П.А., Чадаев Н.Н., Шешин Е.П. Применение наноструктурированных углеродных материалов в перспективных источниках света // Нано- и микросистемная техника, 2007, №9 (86), стр. 15-20.

9. **Лейченко А.С.**, Шешин Е.П., Щука А.А. Наноструктурные углеродные материалы в катодолюминесцентных источниках света // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2007, №6, стр. 94-100.
10. **Лейченко А.С.**, Негров Д.В., Рауфов А.С., Шешин Е.П. Формирование элемента матрицы автоэмиссионного дисплея на основе латерального катода из углеродной фольги // Труды 18-й Международной научно-технической конференции «Современное телевидение», Москва, ФГУП МКБ «Электрон», 2010, стр. 65-67.
11. **Лейченко А.С.**, Негров Д.В., Шешин Е.П. Элемент дисплейной матрицы на основе автоэмиссионного катода из терморасширенного графита // Нано- и микросистемная техника, 2010, №7, стр.
12. **Лейченко А.С.**, Негров Д.В., Рауфов А.С., Шешин Е.П. Формирование наноструктурированной поверхности автокатода из углеродной фольги // Альтернативная энергетика и экология, 2010, №3, стр. 30-33.
13. **Leychenko A.S.**, Negrov D.V., Raufov A.S., Sheshin E.P. Optimization of electron optics for edge field emission device // XVI International symposium "Beam dynamics and optimization", St. Petersburg, 2010, p. 48-49.

Лейченко Александр Сергеевич

Разработка и исследование планарных автоэмиссионных катодов из
углеродных материалов

Подписано в печать 10.06.10

Формат 60x84 Усл. печ. л. 1,25

Тираж 80 экз. Заказ №29

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Московский физико-технический
институт (государственный университет)

141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9