

На правах рукописи



Бессонов Дмитрий Александрович

**СОЗДАНИЕ МИКРООСТРИЙНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ
ПРИБОРОВ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Научный руководитель: **Чеботаревский Юрий Викторович**, лауреат государственной премии СССР в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Межинститутской учебно-исследовательской лаборатории лазерной техники и технологий СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов.

Научный консультант: **Морев Сергей Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «НПП «Торий», г. Москва.

Официальные оппоненты: **Соминский Геннадий Гиршевич**, доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Косарев Илья Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вакуумной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Ведущая организация: Саратовский филиал Института радиотехники и электроники (СФ ИРЭ) им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов.

Защита диссертации состоится «___» _____ 2020 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.211.03. в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.211.03, к.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

Актуальность работы

Создание электровакуумных приборов, использующих в качестве источника электронов автоэмиссионные катоды (АЭК) до настоящего времени является не решенной и актуальной задачей. Стремление разработчиков использовать в приборах вместо традиционных катодов, работающих на принципах термоэлектронной эмиссии, автоэмиссионные основано на преимуществах последних в сравнении с термоэмиссионными источниками эмиссии. Потенциальные возможности автоэмиссионных катодов (АЭК) хорошо известны: практически мгновенный отклик тока на изменение напряжения; высокая плотность тока автоэлектронной эмиссии (теоретический предел $\sim 10^{11} \text{ А/см}^2$); отсутствие источника накала катода; устойчивость эмиссии к колебаниям температуры; малая чувствительность к внешней радиации; экспоненциально высокая крутизна вольт-амперных характеристик.

Развитию направления по созданию и совершенствованию АЭК различных конфигураций посвящено большое количество работ в отечественной и зарубежной научной литературе и периодических изданиях. Среди них следует отметить работы: Бахтизина Р.З., Бондаренко Б.В., Гиваргизова Е.И., Горфинкеля Б.И., Григорьева Ю.А., Гуляева Ю.В., Егорова Н.В., Елинсона М.И., Елецкого А.В., Махова В.И., Месяца Г.А., Рахимова А.Т., Сеницына Н.И., Соминского Г.Г., Татарина Н.В., Фурсея Г.Н., Шредника В.Н., Шешина Е.П., Ч. А. Спиндта, Е.Е. Мартина, У.П. Дайка, Дж.К. Тролана, Р. Фишера и многих других.

Наиболее известным и развитым на сегодняшний день способом создания АЭК является запатентованный компанией SRI International процесс их изготовления с использованием тонкопленочных покрытий и фотолитографии. Её автором Ч. Спиндтом разработана технология формирования автоэммиттеров на кремниевых подложках в форме прямого конуса из молибдена с плотностью упаковки до $1 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$. Общим недостатком триодных ячеек Спиндта с острыми автоэммиттерами является их недостаточная надежность и долговечность. Широкому практическому использованию данных АЭК в промышленных приборах, особенно сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона, препятствует необходимость поддержания в процессе их эксплуатации сверхвысокого вакуума (не хуже 10^{-9} Тор) для минимизации разрушающего воздействия на вершины острых автоэммиттеров высокоэнергетических ионов остаточных газов. Так, если при сверхвысоком вакууме время работы АЭК Спиндта может достигать до 60 000 часов, то при техническом вакууме, соответствующем реальным условиям эксплуатации лампы бегущей волны (ЛБВ), время наработки на отказ не превышает 150 часов. Кроме того данная технология экологически вредна, требует применения разнопланового и дорогостоящего оборудования.

В последние годы исследователи пришли практически к единому мнению, что наиболее высокой стабильностью эмиссии и долговечностью в условиях технического вакуума ($10^{-6} \div 10^{-7}$ Тор) обладают АЭК из углерода в различных его модификациях. Преимущества катодов на основе углерода обусловлены их более широким диапазоном рабочих температур и химической инертностью. Наибольшее число работ в этом направлении посвящено разработке способов формирования АЭК на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и исследованию их характеристик. Поскольку ток, снимаемый с

одиной нанотрубки, не превышает единиц мкА, то для получения больших эмиссионных токов возникает необходимость объединения равновысоких и не экранирующих друг друга УНТ в матрицы. Создание подобных матриц представляет собой очень сложную и технически трудно реализуемую в условиях промышленного производства технологическую задачу. Именно по этой причине триодные ячейки типа Спиндта на основе УНТ до сих пор не созданы.

В последнее время в качестве исходного материала при изготовлении эмитирующих структур АЭК все чаще используется монолитный стеклоуглерод. Наряду с наиболее известным традиционным методом фотолитографии для его обработки все большее распространение получают лазерные технологии. К наиболее значимым из них можно отнести метод глухих отверстий и способ формирования автоэммиттеров лазерным излучением микросекундной длительности с последовательным перемещением его пятна по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Использование первого из них позволило получить матричные эмиссионные структуры, состоящие из пирамидальных острий с аспектным отношением до 30 единиц, с достаточно высокой плотностью упаковки эмиттеров до 10^6 см^{-2} и плотностью тока в диодном режиме до 1 А/см^2 . Однако дальнейшее повышение уровня плотности упаковки острий с целью повышения величины снимаемого с катода тока оказалось неперспективным из-за возрастания влияния негативного эффекта самоэкранизации острий. Поэтому для устранения подобных недостатков и повышения уровней снимаемых с АЭК из монолитного стеклоуглерода токов потребовалась разработка новых конструкций автоэммиттеров и, соответственно, способов их изготовления.

Цель настоящей работы заключается в разработке:

- новых конструкций игольчатых и лезвийных эмиттеров из монолитного стеклоуглерода (СУ-2000) с аспектным отношением от 100 до 600 единиц и усредненным значением плотности тока по вершине острия не менее 10^4 А/см^2 ;
- способа их изготовления на основе комплекса технологических операций с применением ультракороткого импульсного лазерного излучения с последующим теоретическим и экспериментальным исследованием их технических характеристик в составе КСУ.

Для достижения поставленной цели решались следующие научные, технические и технологические **задачи**:

- исследование особенностей механизма локального разрушения стеклоуглерода ультракоротким импульсным лазерным излучением с учетом перемещения зоны обработки и в пакетном режиме высокочастотных пульсаций;
- изучение и анализ напряженно-деформированного состояния заготовок из монолитного стеклоуглерода при указанных выше способах воздействия на основе сформулированных моделей с целью определения технологических параметров неразрушающих режимов обработки;
- экспериментальное определение технологических режимов ультракороткого импульсного лазерного воздействия, в том числе в процессе лазерной заточки,

обеспечивающих формирование на подложках из стеклоуглерода матричных, игольчатых и лезвийных автоэмиссионных структур с заданными техническими параметрами, идентичной формой и размерами;

- формирование комплекса лазерных технологических операций для изготовления матричных, игольчатых и лезвийных автоэммиттеров на основе стеклоуглерода включающего в себя: скрайбирование, фрезеровку, резку, микроструктурирование и заточку с последующей очисткой;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований эмиссионных свойств игольчатых микроструктур в составе КСУ;
- исследование возможностей создания лазерной технологии изготовления многолучевого КСУ с самосовмещенными осями симметрии автоэммиттеров из стеклоуглерода и отверстий сеточного электрода.

Научная новизна работы определяется следующими полученными в работе результатами:

- разработана и реализована не применявшаяся ранее прецизионная технологическая операция лазерного микрофрезерования (лазерной заточки) для изготовления вертикально ориентированных острых автоэмиссионных структур с большим аспектным отношением (отношение высоты эмиттера к радиусу кривизны его вершины >100 единиц) из труднообрабатываемых материалов с использованием особых свойств ультракороткого импульсного лазерного излучения высокой мощности с программно-изменяемыми параметрами воздействия;
- предложена математическая модель для исследования влияния параметров перемещаемого ультракороткого импульсного лазерного воздействия высокой мощности на генерируемое им в объеме хрупких материалов напряженно-деформированное состояние;
- разработан полный цикл (от заготовки до конечного продукта) лазерных технологических операций изготовления АЭК из монолитного стеклоуглерода с матричными, острыми и лезвийными эмитирующими структурами (Патент РФ № 2 658 304 от 10.04.2018);
- предложен оригинальный способ формирования многоострых КСУ с самосовмещенным расположением игольчатых автоэммиттеров из стеклоуглерода относительно отверстий сетчатого электрода (патент РФ № 2 656 879 от 07.06.2018).

Практическая значимость. Разработанный комплекс лазерных технологических операций использован в НПФ «Прибор-Т» СГТУ имени Гагарина Ю.А., НПЦ «Электронные системы» ОАО «НПП «Алмаз» и АО «НПП «Торий» при изготовлении опытно-экспериментальных образцов катодов, КСУ и электронных пушек с игольчатыми и лезвийными эмиттерами из монолитного стеклоуглерода. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке специалистов по направлению 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Методы и средства исследований. При выполнении работы использованы основные научные положения квантовой и вакуумной электроники, геометрической и физической оптики, а также механики деформируемого твердого тела. Опытные экспериментальные исследования проведены с использованием следующего оборудования: импульсного лазерного излучателя «Rapid 06» производства фирмы “Coherent®”, серийной технологической установки «ДМарк-06 RL», металлографических микроскопов NU (Carl Zeiss), Биолам-М и MMP-2P, электронного микроскопа JEOL JSM-7100, MIRA // Tescan, установки лазерного эмиссионного микроанализа Спектр-2000.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью постановки и методов решения рассматриваемых задач, соответствием прогнозируемых результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными, полученными с использованием аттестованных методик испытания АО «НПП «Алмаз», поверенного измерительного оборудования. Компьютерное моделирование выполнено на ЭВМ с процессором класса 2 Intel® Xeon® CPU E5-2690 v2 @ 3.00GHz с использованием программного пакета инженерных расчетов Mathcad 15.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанные модели для оценки напряженно-деформированного состояния заготовок из стеклоуглерода при воздействии ультракороткого импульсного лазерного излучения с учетом перемещения зоны обработки и в пакетном режиме высокочастотных пульсаций, позволяют расчетным путем определить диапазоны неразрушающих технологических параметров при изготовлении вертикально ориентированных автоэмиссионных структур с большим аспектным отношением.

2. Результаты экспериментальных исследований эмиссионных свойств и устойчивости к ударным и вибрационным механическим воздействиям игольчатых АЭК из монолитного стеклоуглерода подтверждают возможность их применения в катодно-сеточных узлах и электронных пушках электровакуумных приборов.

3. Разработанная и реализованная технология лазерной заточки с использованием ультракороткого импульсного лазерного излучения высокой мощности с программно-изменяемыми параметрами воздействия обеспечивает изготовление из труднообрабатываемых материалов вертикально ориентированных острийных автоэмиссионных структур с отношением высоты эмиттера к радиусу кривизны его вершины до 600 единиц, радиусом закругления вершины острия до 2 мкм и усредненным значением плотности тока по вершине острия не менее 10^4 А/см² (Патент РФ № 2 658 304).

4. Закрепление заготовки АЭК с заранее сформированными цилиндрическими пьедесталами относительно сетки так, чтобы торцы вершин пьедесталов располагались в отверстиях сетки, и последующее применение лазерной заточки через отверстия в сетке, обеспечивает изготовление катодно-сеточного узла с соосным расположением острий автоэммиттеров относительно отверстий сеточной структуры независимо от первоначальной соосности выступов и отверстий сетки (Патент РФ № 2656879)

Апробация работы. Материалы работы докладывались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017» (Москва, 2017г.); на X международной конференции молодых ученых и специалистов

«Оптика-2015» (С-Петербург, 2015 г); на симпозиуме “Fundamentals of Laser Assisted Micro– and Nanotechnologies” (FLAMN) (г. Пушкин, С-Петербург 2013г., 2016г.); на конференции «Saratov Fall Meeting» (SFM) (г.Саратов, ежегодно с 2012 по 2019 г.г.); на конференции «SPB-OPEN-16» (Санкт-Петербург 2016г.), на конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016)» (Саратов 2016г.), на международной конференции «Advanced Laser Technologies» (ALT-13) (Будва, Черногория, 2013 г.), ALT-14 (Касси, Франция, 2014 г.); ALT-15 (Фаро, Португалия, 2015 г.). Результаты работы отмечены дипломами: 2-й степени на выставке ФОТОНИКА-2014 «Мир лазеров и оптики» (г. Москва, 2014 г.), 3-й степени на конференции FLAMN-16(г. Пушкин, С-Петербург, 2016г.). Проекты: «Изготовление острийных автоэммиттеров с высоким аспектным отношением методом лазерной микрофрезеровки стеклогуглерода» и «Разработка технологических принципов формирования безнакальных СВЧ-усилителей с мгновенным временем готовности, с компрессией электронного пучка на основе матричных углеродных автокатодов, сформированных на сферической поверхности» , выполненные при подготовки диссертации, награждены в 2015 и 2016 годах дипломами международной организации «Лазерная ассоциация».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, включенных в РИНЦ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи, цитируемые в Web of Science и в SCOPUS.

Личный вклад автора

Автором сформулированы цели и задачи исследования, проведена модернизация используемого при выполнении работы оборудования. Предложен оригинальный способ формирования игольчатых и лезвийных эмиттеров методом лазерной заточки. На основании анализа расчетных данных определен и реализован на практике диапазон неразрушающих технологических режимов обработки, а также разработан комплекс лазерных технологических операций, обеспечивший полный цикл изготовления АЭК от заготовки до конечного продукта.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 139 наименований, и актов внедрения. Диссертация изложена на 159 листах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 8 таблиц.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (Поволжский филиал), ГК № 02.552.11.7021 (08.05.2007), часть из приведенных в ней результатов получена при выполнении грантов:

-«Разработка катодно-сеточных узлов нового поколения с сетками с групповой ячеистостью и структурированной поверхностью катодного материала с применением лазерных технологий», Грант ФЦП НК-566П/8 ГК №П488;

-«Исследование и моделирование физических процессов в стеклосодержащих и керамических материалах при воздействии лазерного излучения с малой длительностью импульса», Грант ФЦП № 14В37.21.0746.

Содержание работы соответствует п.п. 3 - 5 паспорта специальности 05.27.02 «Вакуумная и плазменная электроника».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи, которые требовалось решить в ходе исследования, показана научная новизна работы и практическая значимость ее результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о публикациях и апробации результатов работы.

В главе первой представлен аналитический обзор современного состояния и направлений научных разработок, посвященных созданию автоэмиссионных катодов и электронных пушек на их основе. Выявлены основные проблемы, сдерживающие разработку и применение автоэмиссионных катодов в современных электровакуумных приборах.

На основе анализа существующих способов изготовления автоэмиссионных катодов, триодных ячеек и электронных пушек на их основе сформулированы основные требования к материалам и конструкции триодных автоэмиссионных ячеек с острийными автоэммиттерами:

1. Наиболее приемлемыми материалами автоэммиттеров, обеспечивающими требуемые технические характеристики с точки зрения поставленной выше задачи, являются стеклоуглерод (СУ-2000), молибден, вольфрам и гафний.
2. Для защиты вершины автоэммиттера от токовых перегрузок радиус кривизны их вершины должен составлять единицы микрометров.
3. Для уменьшения рабочих напряжений аспектное отношение должно составлять сотни единиц.
4. Для повышения надежности и долговечности катодно-сеточных узлов, уменьшения их емкости зазор катод-сетка должен быть вакуумным.

Глава вторая посвящена описанию и исследованию теоретических основ и проведению анализа физического процесса взаимодействия ультракороткого импульсного лазерного излучения с труднообрабатываемым хрупким материалом.

Для аналитического исследования, возникающего при воздействии серии ультракоротких лазерных импульсов с высокой плотностью мощности напряженно-деформированного состояния в обрабатываемых материалах, была предложена следующая математическая модель изучаемого процесса.

Удаление вещества с поверхности материала под действием ультракороткого лазерного импульса в процессе холодной лазерной абляции или абляции выпариванием в столь короткие промежутки времени со столь высокой скоростью его истечения порождает импульсную реактивную силу, создающую в зоне воздействия излучения область высокого импульсного давления. При воздействии лазерных импульсов наносекундной длительности пренебрегается кратковременной стадией нагрева вещества до появления парогазового облачка, содержащего твердые частицы и частицы

каплевидной формы, а рассматривается только стадия прямого перехода вещества в парогазовое состояние без раздробления на более мелкие части. Такое допущение вполне приемлемо в силу того, что продолжительность стадии нагрева пренебрежимо мала по сравнению с длительностью импульса лазерного излучения и тем более по сравнению со временем истечения удаляемой массы с обрабатываемой поверхности. За определяющий фактор при выборе не разрушающих режимов обработки принимается наличие высокого импульсного давления, порождаемого реактивной силой, возникающей при истечении удаляемой массы.

В результате такого воздействия в обрабатываемом материале возникает сложный термодинамический процесс с появлением в его объеме нестационарных полей деформаций и напряжений, вызывающих при некоторых режимах обработки либо микро-разрушение хрупких материалов, либо искажение геометрической формы создаваемых эмитирующих структур в заготовках из металла

Основываясь на допущениях принятых для используемой модели, обрабатываемый объект (заготовка) представлен в виде тонкой прямоугольной пластины толщины h , со сторонами a и b , отнесенной к прямоугольной системе координат $OXYZ$ и лежащей на упругом основании. Пластина подвергается локальному силовому воздействию импульсной, распределенной по лазерному пятну нагрузки $q(x,y,t)$ создаваемой реактивной силой.

$$K_{\Phi} \rho \frac{\Delta h}{\Delta t} u = \int_0^a \int_0^b q(x,y,t) dx dy$$

где: u и Δt – соответственно скорость и время истечения материала из зоны воздействия импульса лазерного излучения; ρ - его плотность; Δh - толщина удаляемого за один импульс слоя; K_{Φ} - коэффициент поперечного сечения лунки, зависящий от способа фокусировки и, соответственно, геометрической формы удаляемого объема.

Принципиальное отличие разработанной в данной работе модели от предыдущих ее вариантов состоит в специфике задания распределенной нагрузки, как при обработке серий наносекундных импульсов, так и при воздействии пикосекундных импульсов в пакетном режиме. Так, при описании силового воздействия при наносекундной обработке учитывается перемещение локальной области импульсного давления при воздействии каждого из лазерных импульсов. А в случае пикосекундной обработки учитывается специфика работы лазерной установки в пакетном режиме высокочастотных пульсаций.

В первом случае функция, описывающая распределение нагрузки по лазерному пятну $q(x,y,t)$ для импульса, возникающего в произвольный момент времени $t=mT_0$ ($m=0,1,2,\dots$), где T_0 - период следования импульсов, представлена в виде:

$$q^{(m)}(x,y,t) = q_0 \cdot e^{-\mu \cdot ((x-(x_0+m\delta_x))^2 + (y-(y_0+m\delta_y))^2)} \cdot [H_+(t-mT_0) - H_+(t-mT_0 - \Delta t)]$$

Здесь $q_0 = K_{\Phi} \cdot \rho \cdot u \cdot \Delta h / \Delta t$, x_0 и y_0 – координаты начального положения центра пятна лазерного воздействия при $m = 0$; δ_x и δ_y - проекции вектора его перемещения на оси координат за период следования импульсов T_0 , μ - коэффициент сосредоточенности; q_0 -

численное значение действующей распределенной нагрузки в центре пятна лазерного воздействия, $H_+(t)$ – асимметричная единичная ступенчатая функция Хэвисайда.

Во втором случае при обработке в режиме высокочастотных пульсаций аналитическое описание силового воздействия для пакета, состоящего из $(N+1)$ лазерных пикосекундных импульсов и начинающего действовать в произвольный момент времени $t=mT_0$ ($m=0,1,2,\dots$), где T_0 – период следования пакетов, функция $q^{(m)}(x,y,t)$ задана так:

$$q^{(m)}(x,y,t) = q_0 e^{[-\mu((x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2)]} \sum_{i=0}^{N-1} [H_+(t - i\tau_0 - mT_0) - H_+(t - i\tau_0 - mT_0 - \Delta t)]$$

где α, β – координаты центра пятна лазерного воздействия, τ_0 и T_0 – период следования импульсов в пакете и период следования пакетов соответственно, Δt – длительность импульса давления, $(i+1)$ – номер импульса в пакете.

С учетом геометрических размеров заготовок исследование их напряженно-деформированного состояния в процессе обработки проведено в рамках теории упругих тонких пластин, с использованием гипотезы Кирхгофа. Решение задачи сведено к определению их прогиба $w(x,y,t)$ при условии, что в начальный момент времени все точки заготовки находились в покое. При этом, влияние упругого основания (предметного стола), учтено путем введения в уравнения движения пластины опорной реакции в соответствии с моделью Винклера. Выражения для прогиба получены в виде:

а) при воздействии серии, состоящей из $(M+1)$ наносекундных импульсов

$$w^{(M)}(x,y,t) = \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} f_{kn}^{(m)}(t) \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}.$$

Здесь:

$$f_{kn}^{(m)}(t) = q_0 \frac{q_{kn}}{\omega_{kn}^2} \{ [H_+(t - mT_0) - H_+(t - mT_0 - \Delta t)] [1 - \cos \omega_{kn}(t - mT_0)] + \\ + H_+(t - mT_0 - \Delta t) [\cos \omega_{kn}(t - mT_0 - \Delta t) - \cos \omega_{kn}(t - mT_0)] \}.$$

где:

$$q_{kn} = \int_0^a \int_0^b e^{-\mu((x-(x_0+m\delta_x))^2 + (y-(y_0+m\delta_y))^2)} \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy$$

$$\omega_{kn}^2 = \frac{\pi^4}{\rho h} \left\{ D \left[\left(\frac{k}{a} \right)^2 + \left(\frac{n}{b} \right)^2 \right]^2 + k_0 h \right\}, \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

а E и ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала заготовки соответственно, k_0 – коэффициент жесткости постели.

б) при пикосекундном воздействии серии, состоящей из $(M+1)$ ($M=0,1,2,\dots$) пакетов:

$$w^{(M)}(x,y,t) = \frac{1}{h\rho} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{q_{kn}}{\omega_{kn}^2} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} F_{kn}^{(M)}(t - i\tau_0 - MT_0) \right\} \sin \left(\frac{k\pi}{a} x \right) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \quad (M = 0,1,2,\dots)$$

В этом выражении

$$F_{kn}^{(M)}(x, y, t - i\tau_0 - MT_0) = [H(t - i\tau_0 - MT_0) - H(t - i\tau_0 - MT_0 - \Delta t)] \times \\ \times \left\{ 1 - \cos[\omega_{kn}(t - i\tau_0 - MT_0)] + C_{kn}^{(M)} \cos\left[\omega_{kn}\left(t - i\tau_0 - \frac{M-1}{2}T_0\right)\right] \right\} + \\ + H(t - i\tau_0 - MT_0 - \Delta t) \cos[\omega_{kn}(t - i\tau_0 - MT_0 - \Delta t)] - \\ - \cos[\omega_{kn}(t - i\tau_0 - MT_0)] + C_{kn}^{(M)} \cos\left[\omega_{kn}\left(t - i\tau_0 - \frac{M-1}{2}T_0 - \Delta t\right)\right] \Bigg\}, \\ q_{kn} = \int_0^a \int_0^b e^{-\mu[(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2]} \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy \\ C_{kn}^{(M)} = \sin\left(\omega_{kn} \frac{M}{2} T_0\right) / \sin\left(\omega_{kn} \frac{T_0}{2}\right)$$

Выражения для напряжений определены путем подстановки найденных значений для прогиба в известные формулы. В качестве параметра, позволяющего оценить прочность материала заготовки в процессе обработки, принята интенсивность возникающих в ней напряжений σ_u . Прочность или сохранение геометрической формы эмиттеров оценивалась путем сравнения расчетных значений σ_u с пределами прочности на сжатие и растяжение стеклоглериода, а также пределами пластичности в случае обработки металлов.

Анализ полученных данных показал, что при неоднократном подвижном импульсном лазерном воздействии в заготовке из стеклоглериода возникает сложный высокочастотный колебательный процесс, являющийся результатом наложения инициированных импульсным давлением собственных и вынужденных колебаний. При сохранении одних и тех же параметров лазерного воздействия наибольшее влияние на уровень возникающих при этом напряжений оказывает частота следования импульсов в серии. Путем её подбора можно добиться наименьшего уровня колебаний интенсивности напряжений и тем самым избежать негативных последствий с точки зрения целостности формируемого игольчатого или лезвийного эмиттера из стеклоглериода СУ-2000 в процессе и после окончания прохода при лазерной заточке. По расчетным данным диапазон неразрушающих частот лазерного наносекундного импульсного воздействия оказался в пределах от 8,3кГц до 8,5кГц. На рис. 1, в качестве примера, показано поведение амплитуды колебаний интенсивности напряжений при воздействии серии из пяти импульсов наносекундной длительности $7 \cdot 10^{-8}$ с при частотах их следования а) 7,6; б) 8,4 и в) 8,97 кГц.

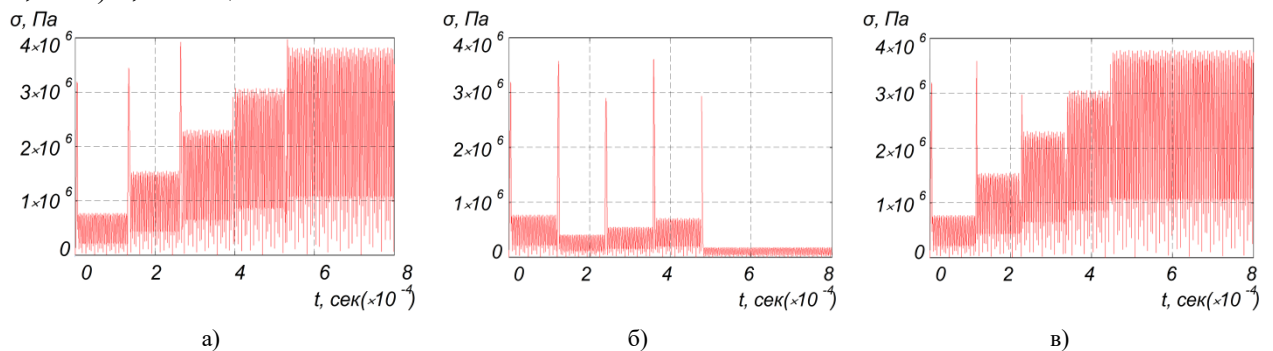


Рис.1

Несмотря на то, что расчетных разрушающих режимов обработки стеклоуглерода или превышения предела пластичности при обработке металлов пикосекундными лазерными импульсами в случае высокочастотных пульсаций не обнаружено, применение этих режимов для обработки стеклоуглерода оказалось нецелесообразным ввиду их низкой производительности. Вместе с тем, применение пикосекундного лазерного воздействия позволило сохранить геометрическую форму игольчатых и лезвийных эмиттеров, изготавливаемых из тугоплавких металлов, что при наносекундном воздействии оказалось невозможным.

Третья глава посвящена разработке и исследованию комплекса лазерных технологических операций для формирования одиночных игольчатых и лезвийных вертикально ориентированных автоэмиттеров на базе стеклоуглерода, *Mo*, *W* и *Hf* с большим аспектным отношением, а также с групповым и матричным их размещением на катодной подложке.

Для обработки стеклоуглерода в качестве базового инструмента была использована серийная маркировочная лазерная установка D-Mark RL с длительностью импульса 70 нс и длиной волны 1,06 мкм. Проведена её модернизация с добавлением систем наблюдения за зоной обработки на базе длиннофокусного бинокулярного микроскопа БМ-51-2 с 8,75× увеличением, ручного механического перемещения обрабатываемых деталей (ручной 3-х координатный стол) и «поддува» для удаления продуктов обработки. Для оснащения модернизированной экспериментальной установки вместо штатной разработана и реализована оптическая система собственной конструкции со специальным 50-миллиметровым короткофокусным объективом и системой совмещения с оптической осью.

Для обработки металлов разработана и создана оригинальная экспериментальная технологическая установка на базе пикосекундного лазерного источника излучения RAPID-06 с длительностью импульса 10 пс и длиной волны 1.06 мкм, снабженная двукратным расширителем луча (beam expander), гальванометрическим сканатором и всеми другими техническими системами, перечисленными в предыдущем абзаце.

Приведен перечень и последовательность разработанных лазерных технологических операций по формированию игольчатых и лезвийных эмиттеров от изготовления заготовки до получения готового продукта, а именно: лазерное скрайбирование, фрезеровка (частный случай фрезеровка полусферических поверхностей), резка, очистка и специальные режимы формирования и заточки матриц и отдельных единиц острийных и лезвийных эмиттеров. Отличительной особенностью, предложенного технологического комплекса от предыдущих, является наличие оригинальных технологических операций – лазерной фрезеровки полусферических поверхностей и «лазерной заточки». Их введение позволило сформировать игольчатые и лезвийные эмитирующие структуры с заданными параметрами не только на плоских, но и сферических поверхностях обрабатываемых материалов.

С применением комплекса указанных выше лазерных технологических операций на базе экспериментального модернизированного и разработанного оборудования созданы не имеющие аналогов в мировой практике одиночные, групповые и матричные

игольчатые и лезвийные эмиттирующие структуры из монолитного стеклоглериода (СУ-2000) и труднообрабатываемых металлических материалов (Мо, W, Hf) с высоким аспектным отношением от 100 и до 1000 единиц на плоских и полусферических поверхностях. Ниже в качестве примера приведены фотографии, полученные на электронном микроскопе JEOL JSM-7100, иллюстрирующие достигнутые результаты.

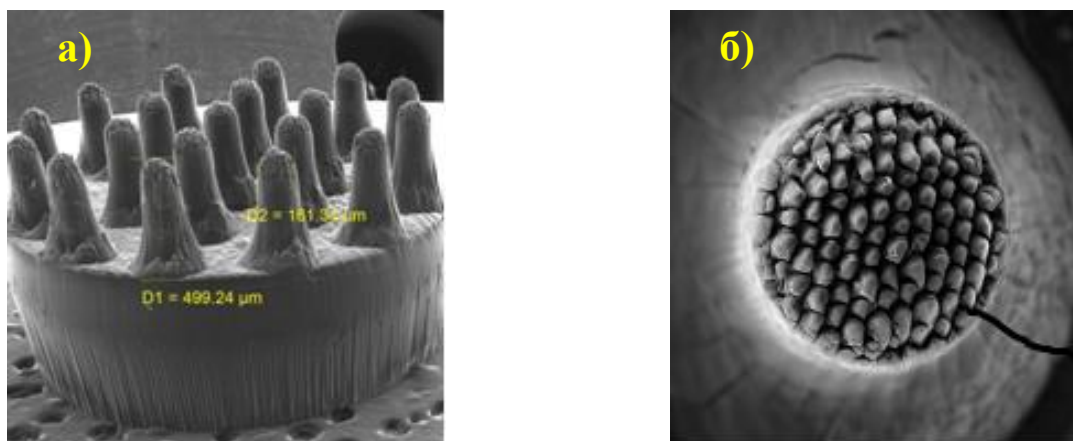


Рис. 2.

На рис. 2 представлены фотографии 19-лучевого катода из монолитного стеклоглериода (2а - общий вид, 2б – вид матрицы на пьедестале сверху). На каждом из пьедесталов с полусферической вершиной диаметром и высотой 150 мкм и ~500 мкм соответственно, сформированы микроострия с плотностью упаковки матрицы $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ и радиусом кривизны микро острий на вершинах $8 \div 15 \text{ мкм}$.

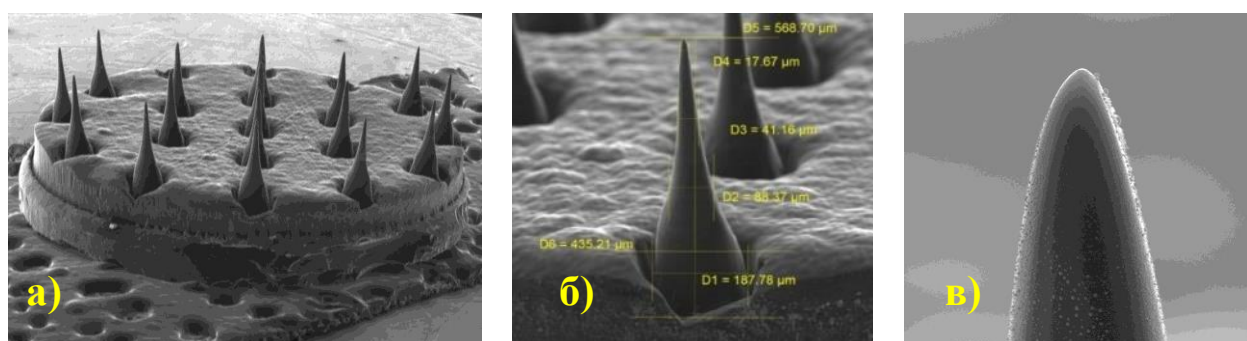


Рис. 3.

На рис. 3 представлены фотографии острейного катода из монолитного стеклоглериода (3а-общий вид, 3б – острие, 3в- его вершина) с 19-ю иглами- эмиттерами с высотой ~500мкм, расположенными в центре катодного диска и на концентрических окружностях радиусом 625мкм и 1250мкм соответственно. Радиус закругления вершин игл $\sim 1 \text{ мкм}$.

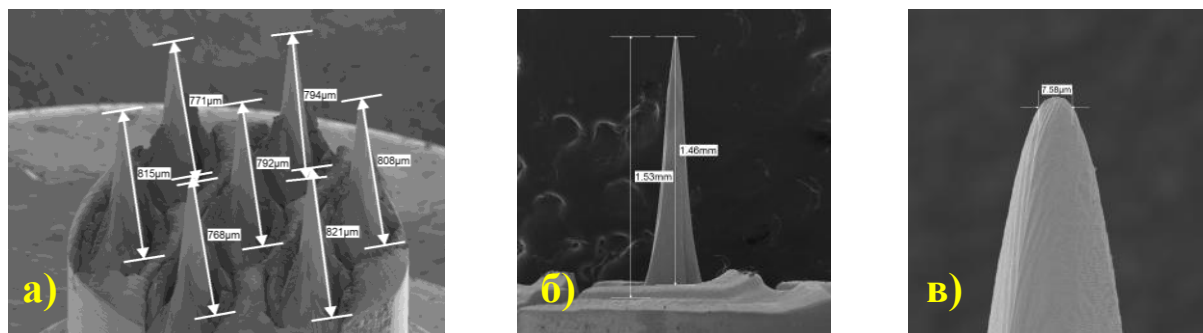


Рис. 4.

На рис. 4 приведены фотографии вольфрамовых АЭК с семью и одним остриями, высотой 750 и 1450 мкм, а также увеличенное изображение вершины острия (рис. 4а, 4б, 4в соответственно). Радиус закругления острий в обоих примерах одинаковый и составляет ~4мкм.

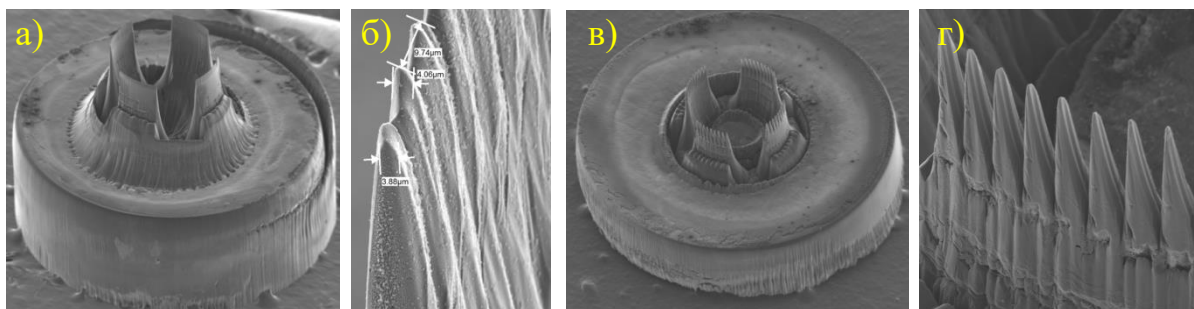


Рис.5

На рис 5. представлены примеры кольцевых лезвийных (рис. 5а, б) и «гребенчатых структур» (рис.5в, г), применяемых в электровакуумных приборах с ленточными и кольцевыми электронными пучками. Лезвие (рис. 5б) и острия гребенки (рис.5г) расположены на радиусе 1мм, их высота ~1мм. Толщина вершины лезвия и диаметр вершин игл «гребенки» одинаковы и составляют ~4мкм.

Продемонстрированные выше достигнутые геометрические параметры острийных и лезвийных катодов получены благодаря применению специально разработанных на базе MScript авторских программ управления энергетическими параметрами и движением лазерного луча. Путем внесения в них соответствующих изменений достаточно просто корректировать геометрические параметры игольчатых и лезвийных структур таких как: высота игл, радиус округления вершин, количество и пространственное расположение на подложке. Время изготовления подобного рода изделий в зависимости от исходного материала и реализуемой конструкции составляет от 20 до 120 минут.

С целью изучения возможности использования изготовленных экспериментальным путем острийных миниатюрных катодов при создании катодно-сеточных узлов были проведены исследования их устойчивости к воздействию вибрационных и ударных механических нагрузок, обусловленных внешними и внутренними факторами, в том числе наличием пондеромоторных сил.

Испытаниям подвергались катоды с одним, семью и девятнадцатью вертикально ориентированными остриями из стеклоуглерода марки СУ-2000 (рис. 6) с аспектным отношением геометрических размеров 360 единиц.

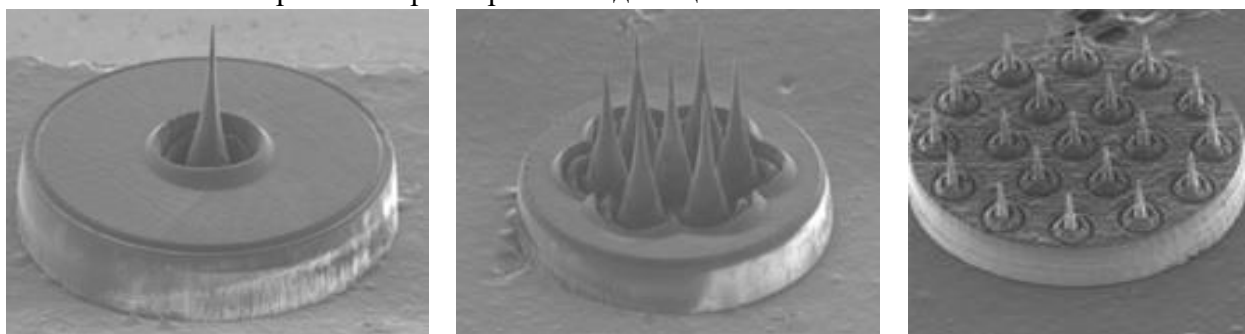


Рис.6

Они проводились на вибрационном (УВЭ100/5-3000) и ударном (12МУ 50/1470-1) стендах соответственно по методике, применяемой для штатных промышленных СВЧ-приборов. Испытуемые катоды подвергались синусоидальным вибрационным (с ускорением до 20g) и ударным (с пиковым ускорением до 100g) нагрузкам. Контроль целостности испытуемых образцов до и после испытаний проводился визуально, с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7100. По результатам проведенных испытаний механических повреждений (разрушений) острий эмитирующих структур не обнаружено, что позволило сделать вывод о возможности их дальнейшего использования при изготовлении катодно-сеточных узлов (КСУ) и электронных пушек специального назначения. Поскольку структура вырезана из единой детали, то полученная матрица обладает повышенной прочностью к разрушению под действием пондеромоторных сил.

В заключении главы 3 проведено исследование уровня воспроизводимости и идентичности получаемых с применением комплекса лазерных технологических операций игольчатых и лезвийных эмитирующих структур. Отмечена острая восприимчивость самой тонкой из операций- «лазерной заточки» к негативному внешнему влиянию окружающей инфраструктуры. Сформулированы условия необходимые для обеспечения высокой воспроизводимости и идентичности острийных и лезвийных эмиттеров при организации массового производства АЭК и катодно-сеточных (КСУ) узлов на их основе.

Четвертая глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям эмиссионных свойств игольчатых микроструктур в составе КСУ. Рассмотрены возможные варианты месторасположения эмиттеров в катодно-сеточной ячейке и построены соответствующие им модели. В качестве примера (рис.7) представлена ячейка с одиночным острием и её графическая модель. Полученные на её основе результаты компьютерного анализа траекторий электронов в случае размещения вершины автоэмиттера в центре ячейки показаны на рис. 8а. На рис. 8б приведены расчетные графики распределения напряженности электрического поля на вершине автоэмиттера при различных его положениях в ячейке: 1, 2 – вершина расположена на оси ячейки при напряжении 3000В и 2350В соответственно; 3 – вершина смещена относительно оси ячейки на 190 мкм при напряжении 2350В. На основе анализа результатов компьютерного

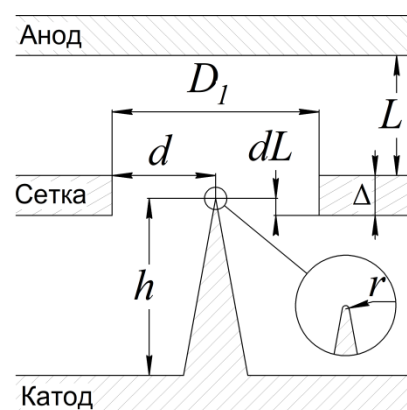


Рис. 7

моделирования установлена существенная зависимость автоэмиссионных свойств игольчатых катодов от размещения эмиттеров в ячейках и их геометрической конфигурации.

Результаты расчетов показали, что при смещении вершины острия от центра ячейки к ее краю величина автоэмиссионного тока возрастает до 100 раз. Смещение вершины острия по оси симметрии ячейки от нижней плоскости сетки до верхней плоскости приводит к увеличению тока автоэмиссии примерно в 5 раз.

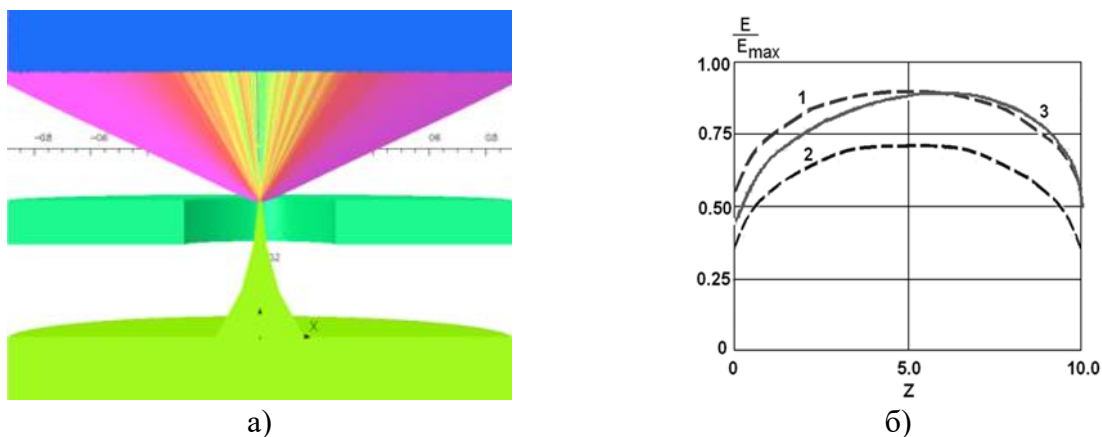


Рис. 8

Экспериментальные исследования эмиссионных свойств игольчатых катодов в составе КСУ различных конфигураций проведены в НПО «Алмаз» на базе опытной установки «Анализатор электронных пучков», предназначенной для измерения вольт – амперных характеристик (ВАХ) электровакуумных приборов. На рис. 9а, в качестве примера, показан КСУ, установленный в электронную пушку с триодной ячейкой, содержащей смещенный относительно центра ячейки на 180мкм игольчатый автоэммиттер высотой 470 мкм с радиусом кривизны 5 мкм и сеточный электрод с диаметром отверстия 480 мкм. ВАХ пушки в импульсном режиме, при длительности импульса $\tau = 20$ мкс и скважности 600, снятые при проведении эксперимента в координатах ток - напряжение ($I-U$) и Фаулера-Нордгейма, приведены на рис. 9б и рис. 9в соответственно. При этом плотность тока, снимаемого с полусферической вершины острия катода, составила 5×10^3 А/см².

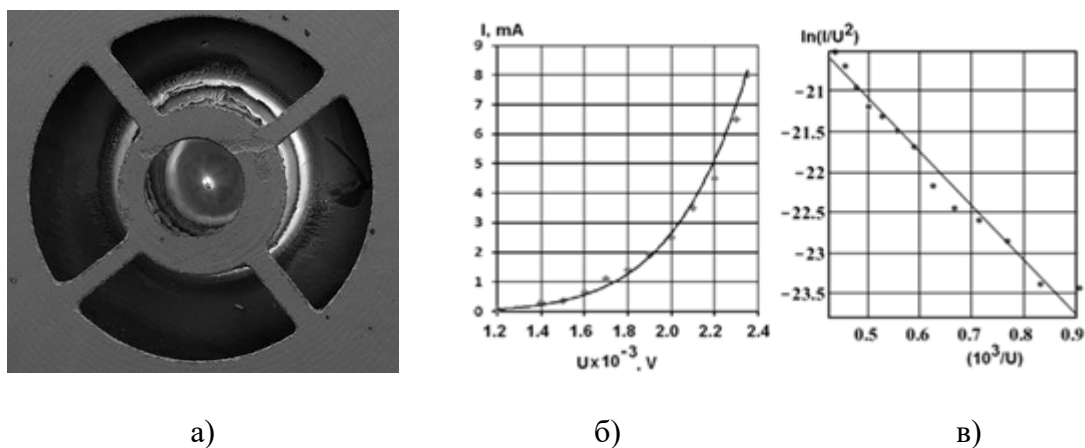


Рис. 9

Результаты экспериментальных исследований эмитирующих свойств одноигльчатых катодов показали хорошее соответствие с прогнозируемыми их расчетными характеристиками в зависимости от геометрии острия и его месторасположения в ячейке. При этом зависимость величины плотности тока от радиуса кривизны вершины острия эмиттера являлась наиболее существенной. Так, при

уменьшении радиуса кривизны вершины автоэммиттера с 5 мкм до 2,5 мкм даже при меньшем по сравнению с предыдущим примером смещении острия от центра ячейки (120 мкм) при том же значении приложенного напряжения плотность тока снимаемого с полусферической вершины возросла почти на порядок и составила $3,6 \times 10^4$ А/см².

При испытании катодов с 7-ми игольчатой эмитирующей структурой ожидаемого аддитивного сложения электронных потоков, с использованием применяемых в производстве способов сборки КСУ, реализовать не удалось из-за невозможности обеспечения требуемой точности взаимного расположения вершин острий относительно отверстий сетчатого электрода. Для устранения негативных последствий некачественной сборки в работе предложен новый, способ формирования многоострийных КСУ с самосовмещенным позиционированием игольчатых автоэммиттеров в ячейках управляющей сетки за счет выполнения операции лазерной заточки непосредственно в ячейке (технология защищена патентом РФ № 2656879).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы, обоснованы перспективы их использования в промышленном производстве.

Основные результаты работы

1. Предложена математическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния заготовок АЭК при формировании эмиттеров воздействием подвижного ультракороткого импульсного лазерного излучения высокой мощности.

2. Разработан комплекс лазерных технологических операций, включающий в себя полный цикл изготовления (от заготовки до конечного продукта) АЭК с вертикально ориентированными острийными и лезвийными эмиттерами с большим аспектным отношением до 600 единиц с одиночным, групповым и матричным размещением их на подложках из монокристаллических труднообрабатываемых материалов (патент РФ 2 658 304).

3. Предложена и внедрена в опытное производство оригинальная операция лазерной заточки, позволившая реализовать эмиттеры с радиусом закругления вершин от 0,5 мкм и высотой до 1.5 мм.

4. Сформулированы требования к производственным помещениям, отвечающим необходимым условиям обеспечения высокой воспроизводимости и идентичности острийных и лезвийных эмиттеров при организации массового производства АЭК и катодно-сеточных (КСУ) узлов на их основе, с использованием предложенной в работе лазерной технологии их изготовления.

5. На основе анализа результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований эмиссионных свойств КСУ разработаны рекомендации по рациональному размещению игольчатых эмиттеров АЭК относительно отверстий сеточного электрода, обеспечивающему наибольшие величины отбираемого тока.

6. Предложен способ изготовления многоострийных КСУ с самосовмещенным позиционированием игольчатых автоэммиттеров в ячейках управляющей сетки за счет выполнения операции лазерной заточки непосредственно в ячейке, позволяющий избежать технологических трудностей при сборке КСУ (технология защищена патентом РФ № 2656879).

7. Разработана технология формирования вертикально ориентированных автоэммиттеров лезвийного типа (свернутое в цилиндр лезвие) с толщиной вершины от 3 мкм для электронно-оптических систем с полым цилиндрическим пучком.

8. На основании результатов экспериментальных исследований устойчивости к воздействию вибрационных и ударных механических нагрузок катодов с одним, семью и девятнадцатью вертикально ориентированными остриями из стеклоуглерода марки СУ-2000 с аспектным отношением геометрических размеров 360 единиц сделан вывод о возможности их использования при создании элементной базы электровакуумных приборов в промышленном производстве.

9. При проведении экспериментальных исследований вольт-амперных характеристик электронной пушки на базе АЭК с игольчатым эмиттером из стеклоуглерода СУ-2000 достигнутое значение плотности тока, отнесенной к площади полусферы вершины эмиттера, составило $\sim 3.6 \times 10^4$ А/см².

Публикации по теме диссертации

Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ

1. Лазерная обработка стеклоуглерода для получения эффективных эмитирующих структур/ Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Чеботаревский Ю.В., Шестеркин В.И.// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 17. № 5. С. 474-481.
2. Улучшение свойств автоэмиссионных ячеек из стеклоуглерода при формировании острий с высоким аспектным отношением методом лазерного фрезерования/ Шестеркин В.И., Соколова Т.Н., Морев С.П., Бессонов Д.А., Сурменко Е.Л., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Муравьев Э.К., Шалаев П.Д., Шумихин К.В.// Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 9. С. 896-904.
3. Improvement in the properties of glassy-carbon field-emission cells in forming spikes with a high aspect ratio via laser milling/ Shesterkin V.I., Shalaev P.D., Sokolova T.N., Bessonov D.A., Surmenko E.L., Morev S.P., Darmaev A.N., Komarov D.A., Murav'ev E.K.// Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Т. 61. № 9. С. 1044-1051.
4. Исследование стойкости к механическим воздействиям острийных автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода с большим аспектным отношением// Шестеркин В.И., Бессонов Д.А., Ерзов С.В., Мельников В.Д., Шалаев П.Д., Шумихин К.В., Косырев В.С./ Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2017. Вып. 1(532). С. 84-88.

Патенты

1. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионным катодом/ Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И.// RU 2 656 879 С1 Опубликовано: 2018.06.07
2. Способ изготовления автоэмиссионного катода/ Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л. и др.// RU 2 526 240 С1 Опубликовано: 20.08.2014
3. Способ изготовления автоэмиссионного катода из углеродного материала/ Шестеркин В. И., Шалаев П. Д., Бессонов Д. А., Сурменко Е. Л., Соколова Т. Н., Попов И. А. // RU 2 658 304 С2 Опубликовано: 2018.06.20

Публикации в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования SCOPUS и Web of Science

1. Improvement in the properties of glassy-carbon field-emission cells in forming spikes with a high aspect ratio via laser milling/Shesterkin V.I., Shalaev P.D., Sokolova T.N., Bessonov D.A., Surmenko E.L., Morev S.P., Darmaev A.N., Komarov D.A., Murav'ev E.K.//Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Т. 61. № 9. С. 1044-1051.
2. Laser formation of tip emitting structures with high aspect ratio on glass-carbon field-emission cathodes/Bessonov D.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L., Popov I.A., Chebotarevsky Y.V., Shesterkin V.I.// Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 741. № 1. С. 012166.

Публикации в других изданиях

1. Электронно-оптические системы на основе автоэмиссионных ячеек с большим аспектным отношением вертикально расположенных эмиттеров из стеклогуглерода// Бессонов Д.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Шестеркин В.И./ Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2017 сборник трудов II Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 8 т.. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2017. С. 238-242.
2. Автоэмиссионные ячейки из стеклогуглерода с высоким аспектным отношением острий и электронно-оптические системы на их основе// Морев С.П., Бессонов Д.А., Соколова Т.Н., Шестеркин В.И. и др./ Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2017. Т. 1. № 1 (1). С. 90-94.
3. Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ// Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Чеботаревский Ю.В./ Вестник Саратовского государственного технического университета. 2015. Т. 4. № 1 (81). С. 69-76.
4. Study of the stress-strain state in glass-carbon plates after ultrafast laser processing// Sokolova T.N., Chebotarevsky Y.V., Surmenko E.L., Konyushin A.V., Popov I.A., Bessonov D.A./ В сборнике: Optics InfoBase Conference Papers Сер. "The European Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO_Europe 2013" 2013.
5. Ultrafast laser processing of glass-phase materials - mathematical simulation// Sokolova T.N., Surmenko E.L., Chebotarevsky Y.V., Konyushin A.V., Popov I.A., Bessonov D.A./ Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Сер. "Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013" 2013. С. 906500.
6. О возможности использования автоэмиссионных ячеек с высоким аспектным отношением острий в электронно-оптических системах ЭВП СВЧ// Бессонов Д.А., Морев С.П., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Муравьев Э.К., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Шалаев П.Д., Шестеркин В. И./ Материалы XIX координационного научно-технического семинара по СВЧ технике Н. Новгород 5-7 сентября 2017, С.33-35.
7. Улучшение свойств автоэмиссионной ячейки из стеклогуглерода с высоким аспектным отношением острий (результаты расчета и эксперимента)// Бессонов Д.А., Шестеркин В.И., Соколова Т.Н. Морев С.П., Сурменко Е.Л., Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Муравьев Э.К., Шалаев П.Д., Шумихин К.В./ Материалы научно – технической

конференции: «СВЧ электроника – 2016». АО «НПП «Исток» им. Шокина. Г. Фрязино. 18 – 19 мая 2016г. С. 30 – 31.

Бессонов Дмитрий Александрович

**СОЗДАНИЕ МИКРООСТРИЙНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ
ПРИБОРОВ ВАКУУМНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2020 г. Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Отпечатано в Издательстве СГТУ, 410054, Политехническая ул., 77

Номер заказа ____

Тел.: +7 (8452) 99-87-39,

Почта: izdat@sstu.ru

Адрес: 410054, Саратов, Политехническая ул., 77