На правах рукописи



Тарабрин Дмитрий Юрьевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ

Специальность 05.27.02 – «Вакуумная и плазменная электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре «Промышленная электроника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: Трубицын Андрей Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Официальные оппоненты: Бердников Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург

Черняк Евгений Яковлевич, кандидат физико-математических наук, директор открытого акционерного общества «Шибболет», г. Рязань

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита диссертации состоится « 24 » декабря 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» http://www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03, д.ф.-м.н., профессор _____М.В. Чиркин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. С развитием физико-аналитического оборудования, нацеленного на применение в вакуумных технологиях производства приборов микро- и наноэлектроники, четко обозначилась потребность в средствах профильного поверхностно локального оже-анализа объектов. Однако на практике возникают ситуации, в которых методы электронной оже-спектроскопии (ЭОС) бесполезны вследствие невысокой чувствительности. В таких случаях положительную роль может сыграть масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ), не имеющая альтернативы по уровню чувствительности среди аналитических методик. К недостатку МСВИ относится существенный уровень разрушений анализируемого объекта в процессе исследований. Комбинированный анализ поверхностей твердых тел методами ЭОС и МСВИ в одной экспериментальной камере позволяет проводить исследования без нарушения вакуума, а пространственное совмещение методов исключает локальное смещение анализируемых точек при смене метода, что увеличивает скорость и корректность анализа.

Сочетание метода ЭОС и МСВИ в одном аналитическом узле позволяет проводить послойный анализ тонкопленочных структур, который имеет ряд преимуществ перед традиционным послойным анализом: информационная глубина имеет величину порядка 1 нм; отсутствие зависимости процесса анализа от интенсивности распыления; малое влияние матрицы на уровень элементной чувствительности; малая анализируемая область по сравнению с областью распыления, что минимизирует кратерные краевые эффекты; возможность анализа распыленного материала.

Наиболее эффективно проблема комбинирования различных методов разрешается путем их пространственного совмещения: ЭОС как основного метода и МСВИ как дополнительного метода, используемого при необходимости. Для комбинированного решения аналитических задач в составе технологического оборудования требуются средства с малыми габаритами и большими фокусными расстояниями «образец-анализатор», что содержит противоречие, поскольку габариты и фокусное расстояние прямо пропорциональны.

Другой способ комбинации методов заключается в построении гибридного спектрометра для ЭОС и МСВИ на базе единой электродной конфигурации. Последний способ нуждается в привлечении инновационных решений как идеологического, так и конструкторского характера.

Степень разработанности темы. С развитием процессов производства современных изделий электроники происходит совершенствование и усложнение физико-аналитического оборудования, что ведет к росту его стоимости. Удорожание оборудования, прежде всего, связано с приданием ему свойств излишней многофункциональности и с разработкой сложных в изготовлении устройств, а не с углублением потребительских качеств. В частности, средства масс-анализа в настоящее время имеют тенденцию развития в направлении увеличения разрешающей способности до 10^6 для нужд биохимической масс-спектрометрии. Данный факт стал причиной отсутствия простых в изготовле-

нии и недорогих средств масс-анализа поверхностей, имеющих высокую чувствительность и достаточное для отладки процессов производства изделий микро- и наноэлектроники спектральное разрешение, а также способных работать в составе комбайна, реализующего, например, такие методы диагностики как ЭОС и МСВИ. Почти два десятка лет назад в России прекращено серийное производство средств электронной спектроскопии. Таким образом, на настоящий момент отсутствует отечественное оборудование, способное решать современные задачи физического материаловедения методами электронной спектроскопии и масс-спектрометрии вторичных ионов в составе технологических установок. Анализ рынка показывает, что предлагаемое зарубежное оборудование также не может удовлетворить перечисленным выше требованиям либо с точки зрения обеспечения технических характеристик, либо с коммерческой точки зрения.

Для создания недорогих средств комбинированного анализа поверхности твердого тела обозначенными методами необходимо использовать технологичные в изготовлении электродные системы и нестандартные решения, не приводящие к существенному удорожанию устройств, однако позволяющие обеспечить требуемые характеристики.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является разработка компактных средств комбинированного анализа поверхности твердого тела с электронным и ионным зондами, интегрируемых в вакуумные технологические комплексы производства приборов микро- и наноэлектроники.

Цель работы достигается решением следующих задач:

1) исследование движения электронов в неоднородном цилиндрическом поле и разработка электродной системы оже-анализатора энергий типа «цилиндрическое зеркало» с большим фокусным расстоянием;

2) разработка и оптимизация конструкции статической длиннофокусной электронной пушки, встраиваемой в энергоанализатор;

3) проведение траекторного анализа одиночных электронных линз в режиме импульсного питания;

4) исследование фокусирующих и дисперсионных свойств изотраекторных полей и разработка на их основе электродной системы для комбинированного анализа энергий и масс заряженных частиц.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Показано, что для уменьшения центрального угла фокусировки электронов в цилиндрическом зеркальном анализаторе с целью увеличения фокусного расстояния достаточно использовать дополнительный конусообразный электрод, формирующий неоднородное электрическое поле в области влета частиц, обладающее угловой фокусировкой второго порядка.

2. Получено аналитическое выражение, определяющее зависимость диаметра отверстия в электроде Венельта от его толщины и высоты посадки катода, которые обеспечивают максимальную величину напряженности электрического поля у эмитирующей поверхности термоэлектронного острийного катода.

3. В ходе численного моделирования обнаружено, что в электрических полях, формируемых электронными линзами с импульсным питанием, возможно уменьшение на порядок сферических аберраций и диаметра кроссовера при фокусировке пакетов электронов по сравнению со статическими электрическими полями за счет исключения расфокусирующей области поля.

4. Обнаружены электродные системы с неоднородными в пространстве электрическими полями, обеспечивающими в изотраекторном режиме угловую фокусировку не ниже второго порядка.

5. Разработана электродная конфигурация спектрометра заряженных частиц со светосилой порядка 10 %, обеспечивающего анализ энергий электронов в статическом режиме и анализ масс ионов в изотраекторном режиме.

Теоретическая и практическая значимость

1. Разработана конструкция длиннофокусного цилиндрического зеркального энергоанализатора, предназначенного для использования в составе комбайна, реализующего методы ЭОС и МСВИ.

2. Разработана методика оптимизации конструкции катодно-модуляторного узла электронной пушки с минимальными угловыми аберрациями.

3. Создана конструкция длиннофокусной миниатюрной электронной пушки, коаксиально встраиваемой в электростатический анализатор энергий оже-электронов и обеспечивающей диаметр пятна на выходе 1 мкм при токе электронного пучка 270 нА.

4. Разработана ионно-оптическая схема светосильного изотраекторного масс-анализатора ионов.

5. Разработан светосильный спектрометр энергий и масс заряженных частиц.

Методы диссертационного исследования. В процессе выполнения диссертационной работы в качестве основного инструмента было использовано приложение ФОКУС, реализующее метод граничных элементов решения полевой задачи с развитой оценкой сингулярных и квазисингулярных интегралов; приложение SIMION, в основе которого заложены конечно-разностные методы; пакет программ конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics. Использование нескольких различных методов численного моделирования позволяет более точно решить поставленные задачи, направленные на нахождение необходимых конфигураций электронно- и ионно-оптических систем. При обработке данных использовался пакет программного обеспечения Matlab.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Использование в цилиндрическом зеркальном анализаторе дополнительного конусообразного электрода с углом наклона образующей 32°±1° позволяет сформировать неоднородное электрическое поле, обладающее угловой фокусировкой второго порядка вблизи центрального угла входа электронов α_0=20°±0.2°, и обеспечивает в два раза большее фокусное расстояние по сравнению с классическим цилиндрическим зеркальным анализатором.

2. Максимальная напряженность электрического поля у эмитирующей поверхности термоэлектронного катода обеспечивается при значении отношения диаметра отверстия в электроде Венельта D_B к высоте посадки катода h, определяемом выражением:

$$Opt(D_B/h)=\frac{K_1(1.5h^2-h\delta_B)+K_2(50h+110\delta_B)+8.8}{K_3\sqrt{h}-5.375\cdot10^{-2}K_1\delta_B^2+13.8K_2\delta_B-4},$$ где δ_B – толщина электрода Венельта в мкм, D_B и h в мкм, $K_1=1\cdot10^{-3}$ мкм$^{-2}$, $K_2=1\cdot10^{-3}$ мкм$^{-1}$, $K_3=1$ мкм$^{-1/2}$.

3. Использование электрических полей, изменяющихся за интервал времени, не превышающий время пролета частиц через электродную систему, позволяет снизить на порядок сферические аберрации и во столько же уменьшить диаметр изображения по сравнению со статическими электрическими полями.

4. Электрические поля, формируемые конусообразными электродными системами с углом наклона образующей 45°, в изотраекторном режиме обеспечивают угловую фокусировку частиц не ниже второго порядка во всем диапазоне энергий.

Достоверность полученных данных подтверждается:

1. Использованием ранее теоретически и экспериментально апробированных методов расчета и моделирования электронно- и ионно-оптических систем;

2. Совпадением в пределах погрешности измерений рассчитанных по аппаратным функциям относительных энергетических разрешений анализаторов ДеМ 3.494.032, ДеМ 3.494.037, ДеМ 3.494.042, двухкаскадного АЦЗ серии «Зерцало» (производство НИТИ, г. Рязань) с экспериментально полученными данными;

3. Совпадением в ходе проведения испытаний рассчитанных значений фокусных расстояний анализаторов, соответствующих их габаритам, и центральных углов влета анализируемых частиц;

4. Подтверждением с помощью используемых методов численного моделирования свойств изотраекторных систем, обнаруженных ранее аналитическими методами.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. В рамках Второй итоговой конференции молодых инноваторов по программе «УМНИК» в Рязанской области, Рязань, 2012 г.;

2. На Всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур», Рязань, 2013 г.;

3. На Международной конференции «10th International Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) and Second International Conference On Emission Electronics (ICEE)», Saint-Petersburg, Russia, 2014 г.;

4. На Международной конференции «9th International Conference on Charged Particle Optics (CPO-9)», Brno, Czech Republic, 2014 г.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, из них 3 работы в изданиях, определенных ВАК Минобрнауки РФ, 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 работа, индексированная в базе данных Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, приложений. Диссертация изложена на 154 страницах машинописного текста и включает 64 рисунка. Библиографический список состоит из 78 наименований цитируемых источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель и задачи исследований, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе рассмотрены основные типы устройств, применяемых в ЭОС и МСВИ, описан их принцип работы и указаны основные характеристики. В сравнительном контексте отмечены достоинства и недостатки отдельных моделей. Наиболее эффективным средством для исследования поверхности твердых тел методом оже-спектроскопии является анализатор типа «цилиндрическое зеркало» (АЦЗ) в силу простоты конструкции и высокой светосилы.

Как правило, каждый из методов анализа поверхности способен предоставить ограниченное количество информации. Именно эти факторы послужили толчком для развития комплексных установок, сочетающих в себе несколько методик анализа. Сочетание в одном аналитическом узле средств ЭОС и МСВИ позволит более эффективно проводить послойный анализ, в силу их взаимного дополнения. Наиболее просто данная задача решается путем пространственного совмещения методов. Однако нельзя исключать возможности построения гибридного спектрометра на базе ЭОС и МСВИ в одном конструктивном узле.

В качестве методов численного моделирования рассмотрены: метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод граничных элементов (МГЭ). Наиболее подходящим методом численного моделирования для расчета электромагнитных полей и проведения траекторного анализа является метод граничных элементов, поскольку он обеспечивает максимальное приближение модели к реальной конструкции.

Завершается первая глава выводами и конкретизацией задач исследования.

Вторая глава посвящена обоснованию выбора инструмента моделирования, разработке электронно-оптической системы длиннофокусного анализатора энергий и длиннофокусной электронной пушки.

В качестве основного инструмента для моделирования электродных систем и расчета формируемого ими электрического поля в работе была использована программа ФОКУС, поскольку МГЭ, реализуемый в ней, позволяет максимально точно и в реальном времени рассчитать распределения электрического и магнитного полей, что необходимо для проведения адекватного траекторного анализа. По результатам тестирования программы сделаны следующие выводы:

– гарантированная точность вычисления потенциала составляет ~ 10^{-4} – 10^{-3} %;

– для электронно-оптических систем с прямолинейными сечениями электродов погрешность вычислений в пределе лимитирована лишь ошибками округления;

– для электронно-оптических систем с криволинейными электродами погрешность расчетов определяется точностью аппроксимации границы прямолинейными отрезками и не превышает при расчетах в реальном времени ~ 10^{-3} %.

Для оже-спектроскопии поверхности твердых тел как одного из эффективных физических методов анализа *in-situ* процессов формирования микро- и наноструктур наиболее пригодными оказываются аксиально-симметричные энергоанализаторы вследствие присущей им высокой светосилы (чувствительности) и разрешающей способности. Технологичными в изготовлении являются цилиндрические, кольцевые и конические электроды в отличие от электродов с криволинейным сечением.

Как показывает практика, для реализации схемы комбинированных исследований путем пространственного совмещения средств различных методов необходимо расстояние от образца до края анализатора (фокусное расстояние) не менее 20 мм при внешнем диаметре анализатора и сепаратора около 80 мм.

На рис. 1 представлена аксиально-симметричная конструкция описываемого типа энергоанализатора.

Расчеты показали, что для обеспечения в такой конструкции фокусного расстояния, равного 20 мм, необходим поток вторичных электронов с образца с центральным углом α_0 около 20° относительно оси *z*.

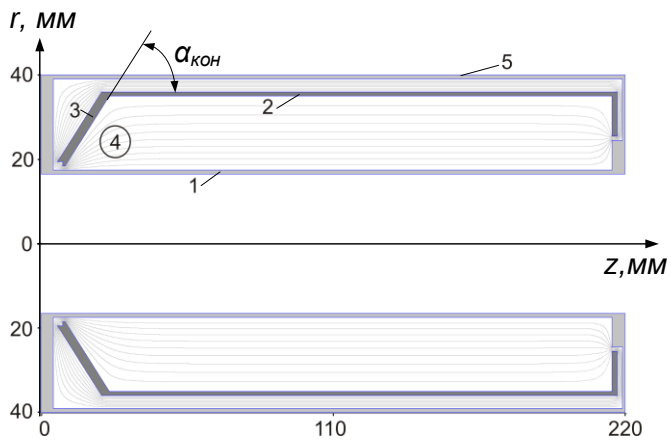
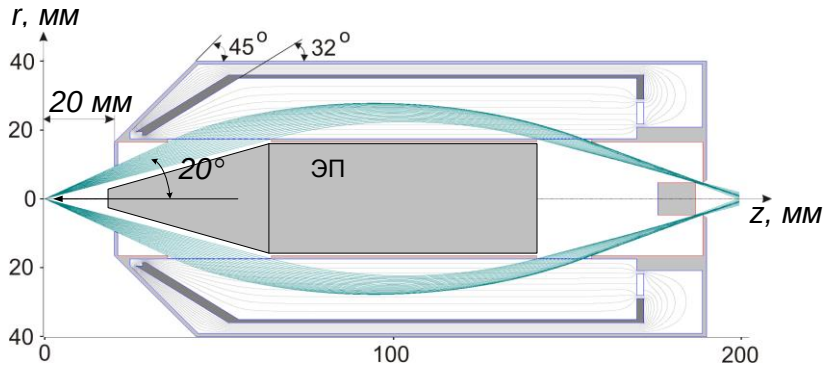


Рис. 1 – Меридиональное сечение конструкции типа цилиндрического конденсатора с неоднородным по оси *z* полем: 1 – внутренний заземленный цилиндрический электрод, 2 – внешний цилиндрический электрод с потенциалом *U*, 3 – конический электрод с потенциалом *U*, создающий неоднородность поля; 4 – область неоднородности поля, 5 – магнитный экран

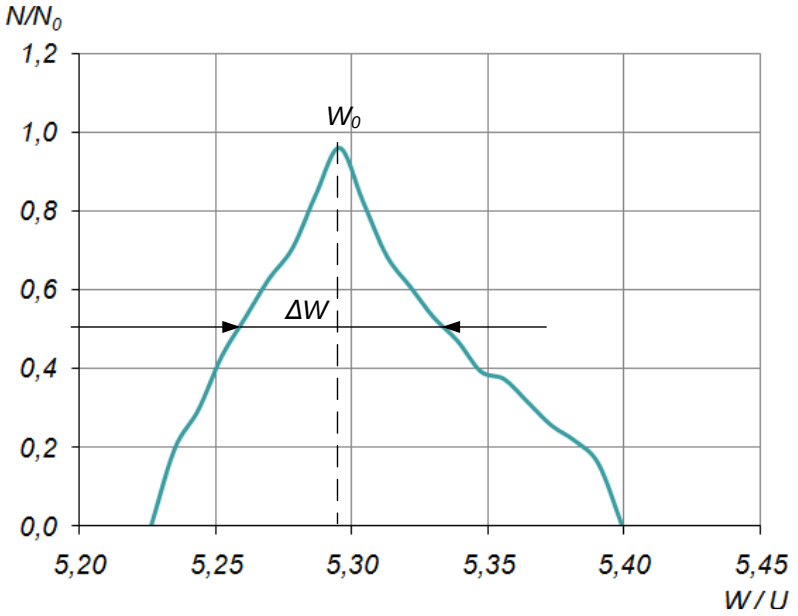
Дело в том, что фокусное расстояние и центральный угол фокусировки определяют положение входной диафрагмы во внутреннем цилиндре и ее размеры. Передний край диафрагмы должен отстоять на некотором расстоянии от области схождения внутреннего цилиндра анализатора с коническим электродом, где очень высок градиент электрического поля, что является ограничением для увеличения центрального угла. При меньшем центральном угле пучок анализируемых электронов минует неоднородное электрическое поле, формируемое коническим электродом, что ухудшит качество фокусировки, а электронно-оптическая система должна обеспечивать угловую фокусировку не ниже второго порядка, которая является оптимальной для устройств энергоанализа. Увеличение фокусного расстояния без изменения радиусов внутреннего и внешнего цилиндров ведет к естественному снижению светосилы (чувствительность) анализатора. Эти факторы определили величину центрального угла, равную 20°.

При изменении угла наклона $\alpha_{кон}$ образующей конического электрода 3 (рис. 1) меняется центральный угол влета электронов α_0, при котором обеспечивается угловая фокусировка второго порядка. Численным методом было установлено, что конструкция анализатора с углом наклона образующей конического электрода около 32° формирует неоднородное в пространстве электрическое поле, обладающее угловой фокусировкой второго порядка вблизи центрального угла влета электронов порядка 20°. Причем изменение угла наклона образующей конического электрода в пределах ±1° приведет к незначительному изменению центрального угла фокусировки (±0.2°). Это говорит о стабильности конструкции, что является положительным фактором при изготовлении электродной системы устройства.

Траекторный анализ конструкции и анализ ее фокусирующих свойств позволяют сделать заключение о возможности обеспечения фокусного расстояния 20 мм при внешнем диаметре 80 мм (рис. 2, а). Для совокупной оценки качества энергоанализатора и его потребительских параметров по результатам траекторного анализа была построена функция пропускания по энергиям (аппаратная функция). На рис. 2, б представлена аппаратная функция разработанного устройства, из анализа которой следует, что при светосиле $\Omega/2\pi$=(cos15°––cos25°)·100 %=6 % обеспечивается относительное энергетическое разрешение $R=\Delta W/W_0\cdot 100$ %=1.5 %, где ΔW – полная ширина аппаратной функции на полувысоте от ее максимума, W_0 – энергия настройки анализатора, соответствующая максимуму функции. Полученные расчетные параметры соответствуют оптимальному случаю. Улучшение разрешения анализатора в разумных пределах (вплоть до 0.2 %) возможно при уменьшении ширины выходной диафрагмы, что, однако, сопровождается естественным уменьшением светосилы.



а



б

Рис. 2 – Электронно-оптическая схема АЦЗ с дополнительным конусообразным электродом (а) и его функция пропускания по энергиям (б): ЭП – электронная пушка, N_0 – число частиц, влетевших в анализатор, N – число частиц, достигших коллектора, W – начальная энергия частиц, U – потенциал внешнего фокусирующего электрода

В АЦЗ для формирования первичного потока электронов наиболее часто используются коаксиально встраиваемые электронные пушки. В связи с этим внешние габариты такой пушки должны соответствовать конструкции внутреннего цилиндра энергоанализатора.

Для проведения качественного анализа энергий оже-электронов размер фокального пятна $d_з$ источника первичных электронов на поверхности образца не должен превышать 1 мкм при энергии электронов порядка $W = 5$ кэВ, являющейся оптимальной для возбуждения оже-электронов большинства материалов. Ток зонда $I_з$ при этом должен быть не менее 100 нА. Традиционно электронные пушки выполняются в виде последовательности катодно-модуляторного узла (КМУ), нескольких линзовых систем ускорения и фокусировки и, при необходимости, электронно-оптической схемы развертки электронного луча в растр на поверхности мишени.

Область пространства, непосредственно примыкающая к катоду, имеет низкий потенциал. В этой области энергия, передаваемая электронам электрическим полем, мала и сравнима по величине с энергией, приобретаемой электронами при эмиссии. Такие области с низким потенциалом являются зонами "неустойчивости", поэтому существенно влияют на качество изображения при его первичном формировании. В частности, это сказывается на яркости электронного пучка в кроссовере и приводит к снижению плотности тока зонда на выходе пушки.

Согласно общей теории катодных линз суммарная угловая аберрация электростатической катодной линзы с вращательной симметрией определяется выражением:

$$\Delta r(z) = \Delta r^{(2)} + \Delta r^{(3)}, \tag{1}$$

где

$$\Delta r^{(2)} = -\frac{W_0}{fE_k}\sin 2\alpha_k \tag{2}$$

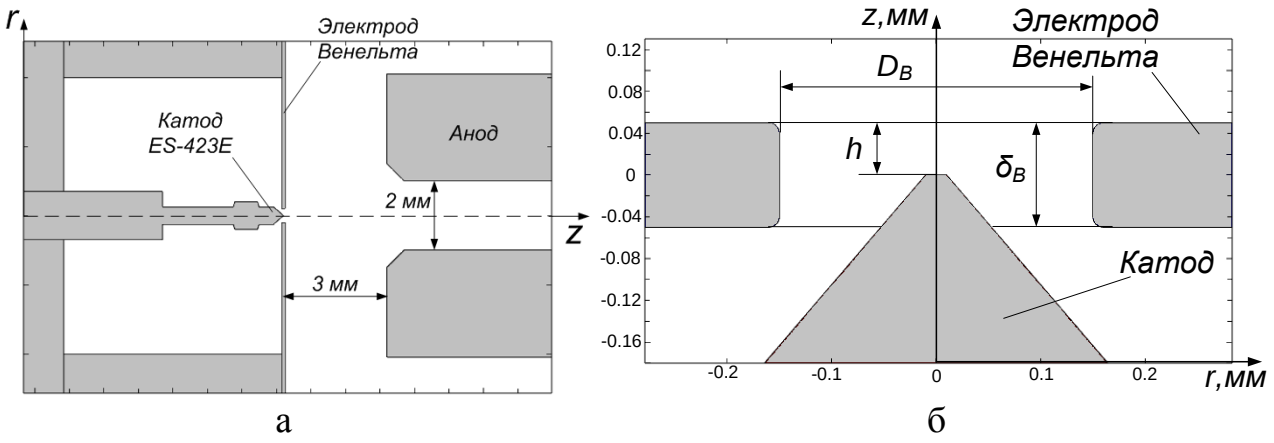
– угловая аберрация второго порядка,

$$\Delta r^{(3)} = \frac{1}{f}\begin{bmatrix} B_1 W_0\sqrt{W_0}\sin^3\alpha_k + 3B_2 r_k W_0 \sin^2\alpha_k + \\ + (2B_3 + B_4) r_k^2\sqrt{W_0}\sin\alpha_k + \\ + B_5 r_k^3 + (B_6\sqrt{W_0}\sin\alpha_k + B_7 r_k) W_0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

– суммарная угловая аберрация третьего порядка. Здесь f – фокусное расстояние катодной линзы, E_k – напряженность поля у поверхности катода, W_0 – начальная энергия частицы, r_k – ее расстояние от оптической оси z в точке вылета, α_k – угол между направлением вылета частицы и осью z, а

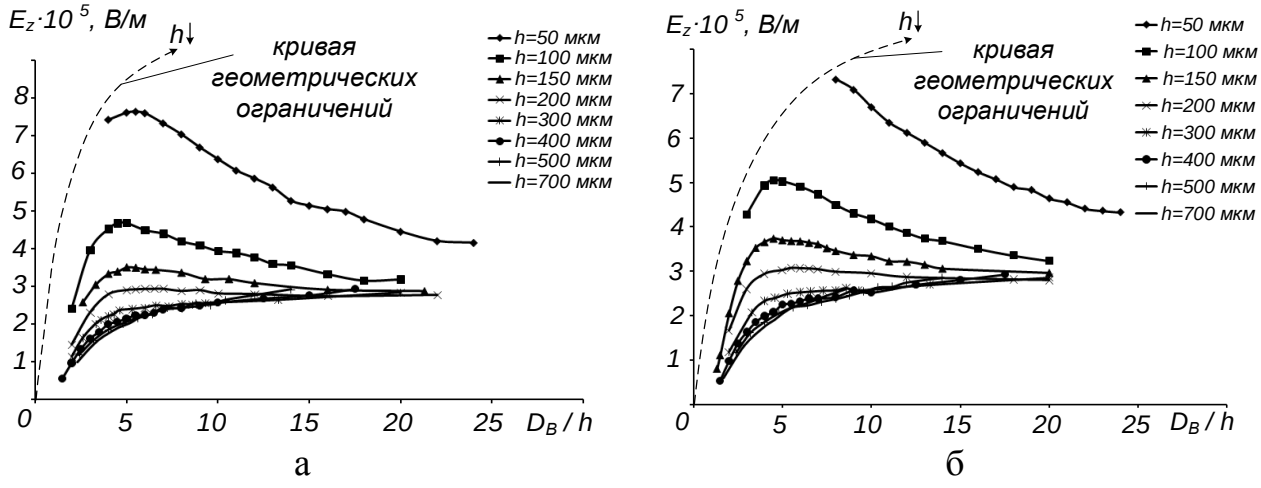
$$\begin{aligned} &B_1 = \frac{16}{E_k^4}J_1, \quad B_2 = \frac{8}{E_k^3}J_2, \quad B_3 = \frac{4}{E_k^2}J_3, \quad B_4 = \frac{4}{E_k^2}J_4, \\ &B_5 = \frac{2}{E_k}J_5, \quad B_6 = \frac{4}{E_k^2}J_6, \quad B_7 = \frac{1}{E_k}\left(2J_7 + \frac{1}{R_k}\cos^2\alpha_k\right) \end{aligned} \tag{4}$$

– коэффициенты (постоянные) аберраций, где R_k – радиус кривизны поверхности катода, а $J_1 – J_7$ – интегралы, зависящие лишь от осевого распределения электростатического потенциала $U = U(z)$. Как следует из равенств (2)–(4), для уменьшения суммарной угловой аберрации второго и третьего порядков необходимо повышать напряженность поля E_k у эмитирующей поверхности катода. Достигнуть максимальной напряженности поля у поверхности катода можно путем оптимизации геометрии электродов КМУ и потенциалов на них. На рис. 3 представлена электродная система КМУ, состоящая из термоэлектронного катода на основе гексаборида лантана (ES-423E), электрода Венельта в виде тонкой пластины с отверстием и полого цилиндрического анода. На рис. 4 представлены зависимости напряженности электрического поля в центре эмитирующей поверхности катода от отношения диаметра отверстия в электроде Венельта D_B к высоте посадки катода h.



а б

Рис. 3 – Аксиально-симметричная модель катодно-модуляторного узла (КМУ) электронной пушки: а – общий вид; б – геометрические параметры КМУ



а б

Рис. 4 – Графики зависимости напряженности электрического поля на оси *z* на расстоянии 1 мкм от эмитирующей поверхности катода для двух толщин электрода Венельта: а – δ_B = 100 мкм, б – δ_B = 200 мкм

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что при некоторых значениях высоты посадки катода (100 ÷ 300 мкм) существуют оптимальные отношения D_B / h, при которых наблюдается максимальное значение напряженности электрического поля в центре эмитирующей поверхности катода или зависимость имеет характер насыщения (h = 300 мкм). С учетом критерия оптимальности, основанного на максимуме напряженности электрического поля в прикатодной области, были построены зависимости, определяющие оптимальные геометрические параметры электродной системы КМУ (рис. 5).

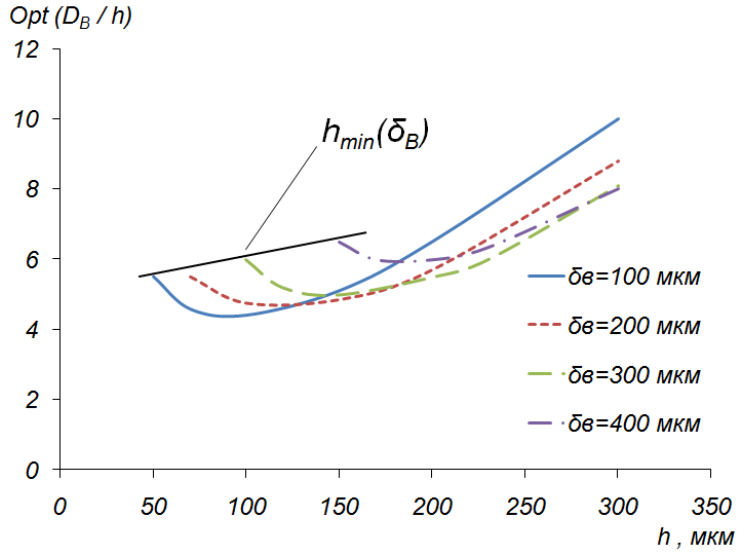


Рис. 5 – Графики зависимости оптимального отношения D_B /h от высоты посадки катода h при различных толщинах электрода Венельта δ_B

Также была найдена функция, позволяющая определить геометрические параметры КМУ с минимальными угловыми аберрациями:

$$Opt(D_B/h)=\frac{K_1(1.5h^2-h\delta_B)+K_2(50h+110\delta_B)+8.8}{K_3\sqrt{h}-5.375\cdot10^{-2}K_1\delta_B^2+13.8K_2\delta_B-4}, \quad (5)$$

где K_1=1·10^{-3} мкм$^{-2}$, K_2=1·10^{-3} мкм$^{-1}$, K_3=1 мкм$^{-1/2}$ – численно определенные коэффициенты, h и δ_B – высота посадки катода и толщина Венельта, выраженные в микрометрах. Полученная функция имеет следующую область определения:

$$\begin{aligned}&\delta_B\in[100;650],\ мкм\\&h\in[h_{\min}(\delta_B);300],\ мкм,\end{aligned} \quad (6)$$

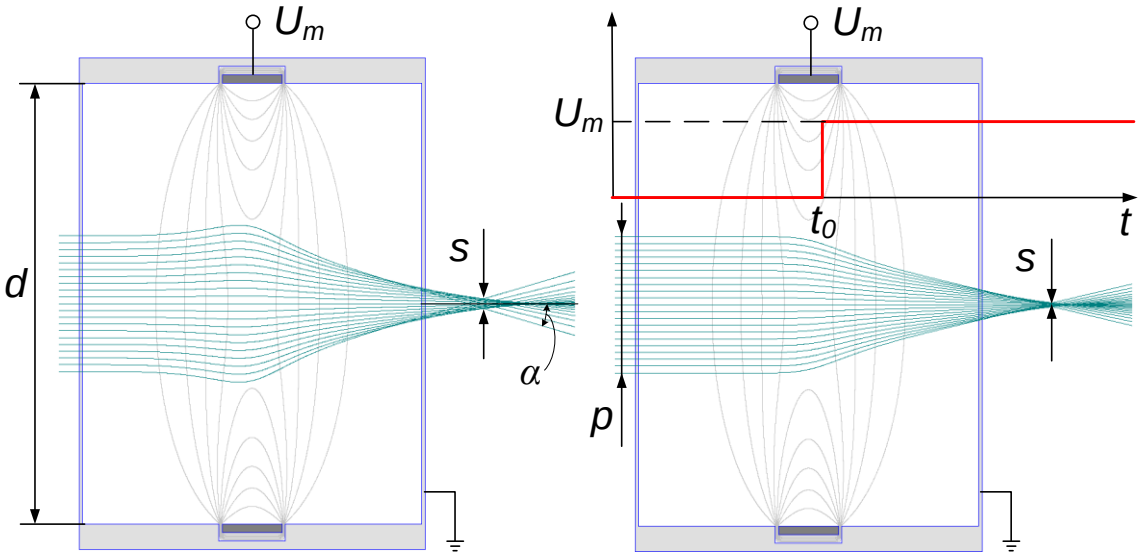
где

$$h_{\min}(\delta_B)=6\cdot10^{-4}\delta_B^2+45. \quad (7)$$

Для исследования поверхности образца с разрешением 5 мкм и хуже, но при максимально возможном токе пучка целесообразно использовать выходную линзу, состоящую из трех электродов и имеющую несимметричное питание (*U1<U2<U3*). Такая линза имеет стабильное фокусное расстояние по отношению к небольшим изменениям питающих напряжений. Стабильность объясняется «колоколообразной» функциональной зависимостью фокусного расстояния линзы от потенциала *U2* среднего электрода (патент РФ № 2563977).

Для получения на выходе электронной пушки размера электронного пятна ~ 1 мкм и меньше используются две короткофокусные линзы для уменьшения размера изображения до 1 мкм. На выходе электронной пушки расположена третья длиннофокусная линза, переносящая изображение микронного размера на образец. С помощью траекторного анализа было установлено, что ток пучка на выходе электронной пушки составил 270 нА при диаметре 1 мкм, что удовлетворяет заданным параметрам.

В третьей главе рассмотрен вариант снижения сферических аберраций в одиночных линзах за счет перехода от статического способа фокусировки непрерывных пучков электронов к фокусировке пакетов частиц импульсным напряжением. На рис. 6, а продемонстрирован результат фокусировки электронного потока статической одиночной линзой, а на рис. 6, б – линзой, в которой напряжение на центральный (фокусирующий) электрод подается скачкообразно в момент времени t_0.



а б

Рис. 6 – Фокусировка электронного потока одиночной линзой: а – в статическом режиме; б – в режиме скачкообразного изменения напряжения

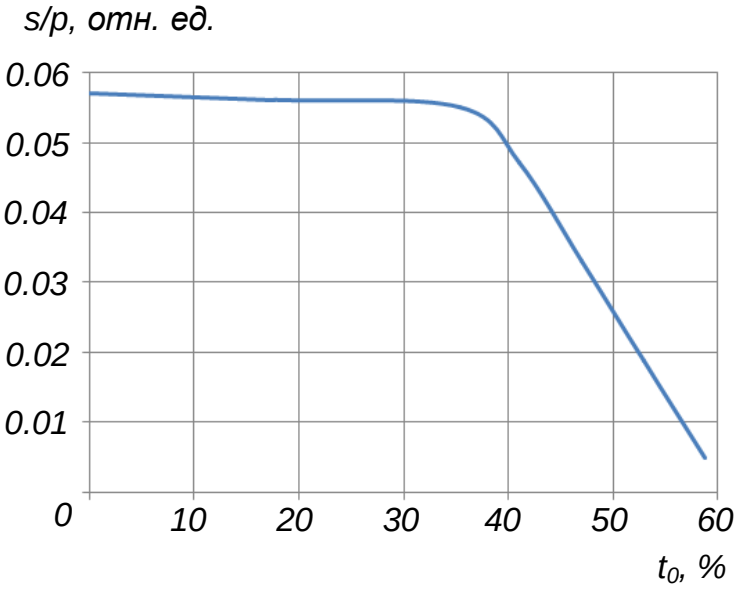


Рис. 7 – Зависимость относительного диаметра наименьшего сечения от момента запуска импульса напряжения

При увеличении времени задержки фокусирующего импульса до 58 % размер кроссовера уменьшается на порядок (рис. 7). Это связано с тем, что не осевые электроны, пролетая через линзу, минуют расфокусирующую область поля, в результате чего коэффициент сферической аберрации такой линзы уменьшается на порядок. Коэффициент сферической аберрации $C_{сф}$ и размер кроссовера s связаны следующим выражением:

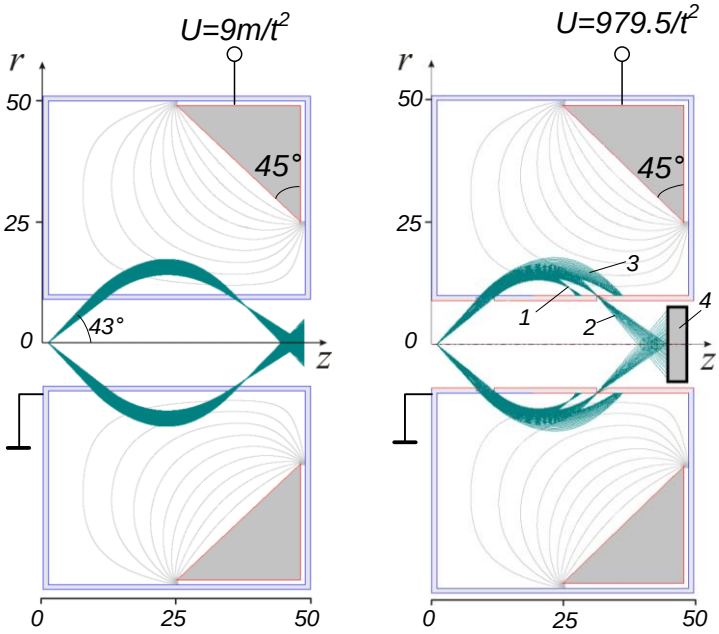
$$s = \frac{1}{2} C_{сф} \cdot \alpha^3, \qquad (8)$$

где α – угол между траекторией неосевого электрона и оптической осью в плоскости фокуса.

Четвертая глава посвящена изучению фокусирующих свойств электронно-оптических систем с изотраекторным электрическим полем. Электрическое поле называется изотраекторным, если оно изменяется по закону:

$$U(r,z,t) = \left(\frac{t_{\min}}{t} \right)^2 \cdot U_0(r,z), \qquad (9)$$

где t – время движения заряженных частиц, стартовавших из источника в t=0, t_{min} – положительная постоянная, введенная в формулу как обезразмеривающий параметр, который определяет момент начала генерации изотраекторного поля по закону (9), $U_0(r,z)$ – пространственное распределение потенциала.



а б

Рис. 8 – Схема изотраекторного зеркала: а – угловая фокусировка ионов массой m в диапазоне углов 40°–49°; б – разделение потоков ионов разной массы m (1 – m/q=90 а.е.м., 2 – m/q=100 а.е.м., 3 – m/q=110 а.е.м., 4 – приемник ионов)

Численным моделированием установлены конструкции электродных систем, обладающие угловой фокусировкой не ниже второго порядка. На рис. 8 представлена схема изотраекторного зеркала, демонстрирующая наличие угловой фокусировки.

Данная электродная система состоит из внутреннего заземленного цилиндра и внешнего конического электрода с углом наклона образующей 45 º, на который подается переменный фокусирующий потенциал в соответствии с выражением (9). Порядок фокусировки такой системы равен 4, а центральный угол фокусировки равен 43º.

Рис. 8 показывает возможность построения изотраекторного масс-анализатора на базе такой схемы. Для полной характеристики аналитических возможностей предлагаемого масс-анализатора

численно промоделирована его функция пропускания по массам (аппаратная функция).

Анализ аппаратной функции позволяет сделать вывод о возможности масс-анализатора обеспечить разрешающую способность $m_0/\Delta m$=555 при светосиле $\Omega/2\pi$=11 %. Здесь Δm – полоса пропускания масс на полувысоте аппаратной функции. Причем еще раз стоит заметить, что ионы всего диапазона энергий вносят свой вклад в регистрируемый сигнал.

На базе схемы, изображенной на рис. 8, была разработана конструкция устройства для комбинированного анализа методами электронной оже-спектроскопии и масс-спектрометрии вторичных ионов (патент РФ № 136237).

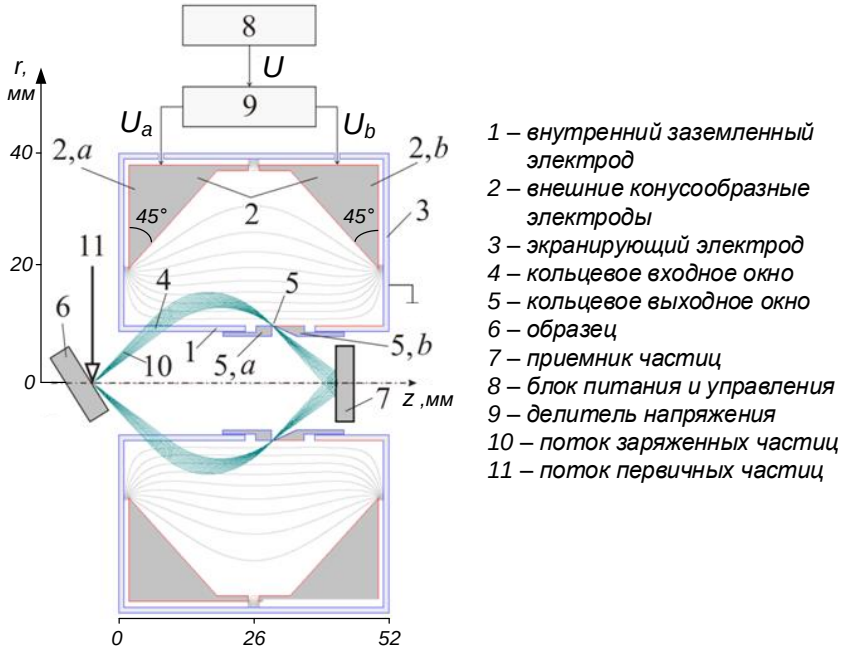


Рис. 9 – Схема анализатора энергий и масс заряженных частиц

Данное устройство состоит из внутреннего заземленного цилиндра и двух конусообразных внешних электродов с углом наклона образующих 45° (рис. 9). В режиме непрерывного энергоанализа электронов на внешние электроды подаются одинаковые потенциалы. Центральный угол фокусировки равен 39º. Анализ аппаратной функции показывает, что при светосиле $\Omega/2\pi$=11 % относительное энергетическое разрешение $\Delta W/W$ составляет 0.2 %. В изотраекторном режиме масс-анализа пакетов ионов $U_a(t)=0.08C(m)/t^2$, а $U_b(t)=C(m)/t^2$, где t – время, отсчитываемое от начала движения пакета вторичных ионов, $C(m)=16.88m$, m – масса, на которую настроен прибор. Масс-анализатор обладает угловой фокусировкой четвертого порядка вблизи центрального угла 39º. Анализ функции пропускания по массам показывает, что масс-анализатор обеспечивает разрешающую способность $m/\Delta m \approx 200$ при светосиле $\Omega/2\pi$=11 %. Таким образом, данная конструкция устройства реализует два метода анализа поверхности твердого тела – МСВИ и ЭОС.

В пятой главе описана разработка конструкции длиннофокусного оже-микрозонда с указанием технологических допусков на изготовление деталей. В качестве материала электродов предлагается использовать нержавеющие стали марок 1Х18Н9Т либо 12Х18Н10Т, которые часто применяются в вакуумной технике. Материалом для изолирующих элементов может служить вакуумная

керамика марок ВК94–1 и ВК100–2. Для изготовления электродной системы необходимы высокоточные станки с ЧПУ, способные обеспечить обработку сопрягаемых поверхностей не хуже H7/h6. На рис. 10 представлена конструкция электродной системы длиннофокусного оже-микрозонда в разрезе, разработанная в среде твердотельного моделирования SolidWorks.

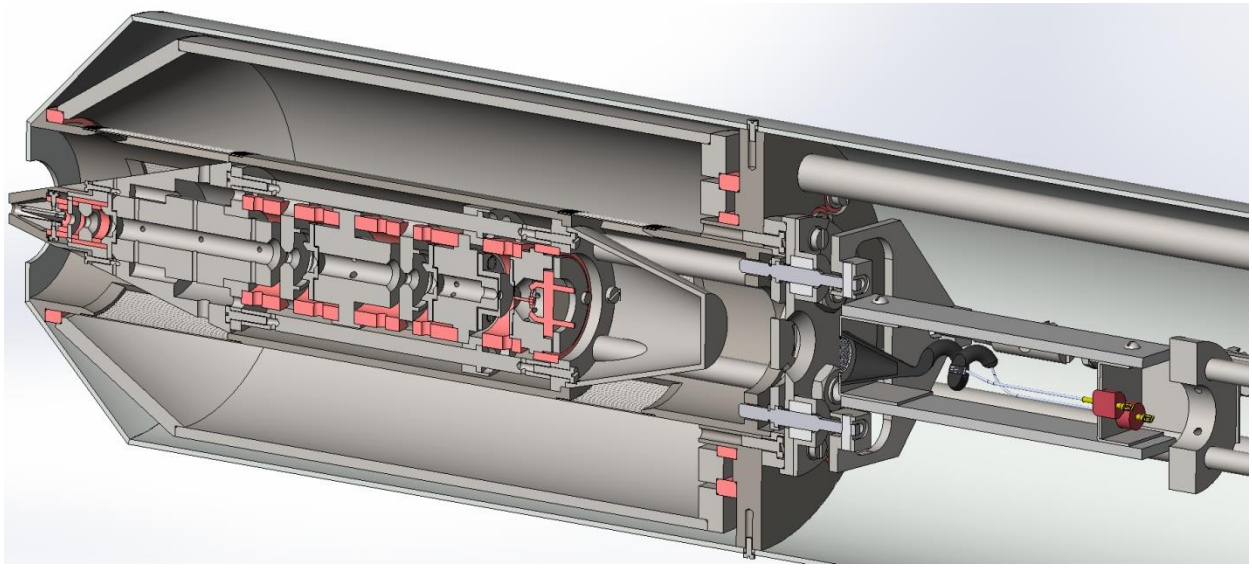


Рис. 10 – Конструкция электродной системы длиннофокусного оже-микрозонда

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований закономерностей движения электронов в статических, импульсных и изотраекторных электрических полях были разработаны компактные средства комбинированного анализа поверхности твердого тела, предназначенные для интегрирования в вакуумные технологические комплексы производства приборов микро- и наноэлектроники.

Получены следующие основные результаты:

1. Разработаны электронно-оптическая система и модель цилиндрического зеркального анализатора энергий с увеличенным в два раза фокусным расстоянием при тех же габаритах по сравнению с классическим зеркальным анализатором. Результат достигнут благодаря использованию в цилиндрическом зеркальном анализаторе дополнительного конусообразного электрода с углом наклона образующей 32°±1º, позволяющего сформировать неоднородное электрическое поле, обладающее угловой фокусировкой второго порядка вблизи центрального угла входа электронов α_0=20°±0.2°.

2. Установлено, что для минимизации угловых и сферохроматических аберраций необходимо повышать напряженность электрического поля у эмитирующей поверхности катода путем выбора оптимальной геометрии электродной системы. С учетом критерия оптимальности, основанного на максимуме напряженности электрического поля в прикатодной области, была получена функция зависимости оптимального диаметра отверстия в электроде Венельта

D_B от толщины электрода Венельта δ_B и высоты посадки катода h. Минимальная высота посадки катода при этом определяется геометрическими ограничениями.

3. Разработана электронно-оптическая система и модель длиннофокусной электронной пушки, обеспечивающей рабочее расстояние не менее 20 мм при внешнем диаметре не более 35 мм и длине около 150 мм, способной формировать на выходе электронный пучок с регулируемым размером в микронном и нанометровом диапазоне.

4. Установлено, что в электрических полях, формируемых электронными линзами с импульсным питанием, возможно снижение сферических аберраций при фокусировке пакетов электронов за счет исключения действия расфокусирующей области поля электронной линзы. Следствием снижения аберраций является уменьшение (на порядок) диаметра кроссовера по сравнению со статическими полями.

5. С помощью численного моделирования определены конфигурации электродных систем с неоднородными в пространстве электрическими полями, обеспечивающими в режиме изменения фокусирующего поля по закону, обратно пропорциональному времени пролета частиц, угловую фокусировку не ниже второго порядка. Построение на базе таких изотраекторных систем масс-анализаторов обеспечивает высокие значения разрешающей способности ($m_0/\Delta m$ = 555) и светосилы ($\Omega/2\pi$=11 %).

6. Разработана электродная система спектрометра заряженных частиц, обеспечивающего анализ энергий электронов в статическом режиме с разрешением 0.2 % и анализ масс ионов в изотраекторном режиме с разрешающей способностью 200. Спектрометр обладает высокой чувствительностью – светосила $\Omega/2\pi$ в обоих режимах составляет не ниже 11 %.

Изотраекторные электрические поля являются перспективным средством устранения хроматических аберраций. В дальнейшем необходимо провести исследование и расчет возможного разброса пакетов анализируемых частиц в пространстве, оценку его влияния на разрешающую способность масс-анализаторов, построенных на базе исследованных в данной работе изотраекторных систем. Также в дальнейшем необходимо разработать опытный макет анализатора энергий и масс заряженных частиц, что непременно повлечет за собой еще одну задачу. Она заключается в разработке источника питания, обеспечивающего изменение напряжения обратно пропорционально квадрату времени пролета частиц (ионов) через масс-спектрометр. Обязательными опциями источника питания должны быть регулируемая амплитуда и синхронизация по времени с пакетом анализируемых ионов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, индексированных в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Tarabrin D.Yu., Gololobov G.P., Trubitsyn A.A. Numerical Simulation of a Cathode Modulator Unit of an Electron Gun // Proceedings of 10th International

2. Vacuum Electron Sources Conference (IVESC) and Second International Conference On Emission Electronics (ICEE), Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 04, 2014, P. 264 – 265.

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

3. Трубицын А.А., Толстогузов А.Б., Саулебеков А.О., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Камбарова Ж.Т., Кукса П.И. Проектирование длиннофокусного ожемикроанализатора // Вестник РГРТУ. – 2012. – № 42-4. – С. 54–59.

4. Трубицын А.А., Дубков М.В, Тарабрин Д.Ю. Изотраекторные электронно- и ионно-оптические системы с угловой фокусировкой // Успехи современной радиоэлектроники. – 2014. – №10. – С. 57-62.

5. Тарабрин Д.Ю. Оценка влияния пространственного заряда в катодномодуляторном узле электронной пушки // Вестник РГРТУ. – 2015. – № 53-3. – С. 134-138.

Охранные документы:

6. Патент на полезную модель № 136237, МПК H01J 49/40. Анализатор энергий и масс заряженных частиц. Трубицын А.А., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю. – дата выдачи 27.12.2013. Бюл. №36.

7. Трубицын А.А., Тарабрин Д.Ю. Электростатическая линза со стабильным фокусным расстоянием // Патент на изобретение № 2563977 от 18.06.2015.

8. Трубицын А.А., Суворов Д.В., Гололобов Г.П., Тарабрин Д.Ю., Клягина М.А. Моделирование движения заряженных частиц в газовой среде // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015612418. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.02.2015.

9. Патент на полезную модель № 152659, МПК H01J 49/00. Электронный спектрограф для анализа пленочных структур. Гололобов Г.П., Суворов Д.В., Трубицын А.А., Сливкин Е.В., Тарабрин Д.Ю. – дата выдачи 10.06.2015. Бюл. №16.

Прочие публикации:

10. Dubkov M.V., Kuksa P.I., Tarabrin D. Yu., Trubitsyn A.A. AES-SIMS Combine // Abstracts of the 9th International Conference on Charged Particle Optics (CPO-9). – Czech Republic, Brno, 2014. – P. 87.

11. Тарабрин Д.Ю., Трубицын А.А. Катоды, используемые при построении современного аналитического оборудования // Электроника: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань, 2012. – С. 43 – 53.

12. Тарабрин Д.Ю., Гололобов Г.П., Шатилов С.Г., Тыщенко М.С. Метод получения функциональных покрытий на основе углеродных нанотрубок для автоэмиссионных катодов // II Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки, технологии и производства». – С.-Петербург, Россия, 2014. – С. 47 – 51.

13. Тарабрин Д.Ю. Длиннофокусная электронная пушка // Труды Всероссийской молодежной школы-семинара «Диагностика наноматериалов и наноструктур»: сборник. – Рязань: РГРТУ, 2013. – С. 67 – 68.

Тарабрин Дмитрий Юрьевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОГО АНАЛИЗА ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОННОЙ ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИИ И МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.10.15. Формат бумаги 60х84 1/16.
Бумага ксероксная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.