

УДК 537.533.34

На правах рукописи

КАМБАРОВА ЖАНАР ТУРСЫНОВНА

**Расчет и проектирование электростатических анализаторов потоков
заряженных частиц**

Направление «Нанотехнологии и нелинейная физика»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:
д.ф.-м.н., профессор Саулебеков А.О.,
доктор PhD Венос Д.

Республика Казахстан
Караганда, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ОПТИКИ	10
1.1 Обзор существующих энергоанализаторов пучков заряженных частиц	10
1.2 Методы расчета систем энергоанализа пучков заряженных частиц	27
2 ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭЛЕКТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ESA-12 ТИПА «ДВУХКАСКАДНОЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО» В РЕЖИМ СПЕКТРОГРАФА	36
2.1 Электростатический электронный спектрометр ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало»	37
2.2 Расчет аппаратной функции электронного спектрометра ESA-12	40
2.3 Перевод электронного спектрометра ESA-12 в режим спектрографа	46
3 РАЗРАБОТКА СВЕТОСИЛЬНЫХ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	53
3.1 Энергоанализатор из последовательно расположенных электростатических цилиндрического и гиперболического зеркал	53
3.1.1 Расчет электронно-оптических характеристик энергоанализатора из последовательно расположенных цилиндрического и гиперболического зеркал	54
3.1.2 Моделирование электронно-оптической схемы комбинированного энергоанализатора из последовательно расположенных электростатических цилиндрического и гиперболического зеркал	60
3.2 Электронно-оптическая схема электростатического энергоанализатора из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал	66
3.2.1 Расчет электронно-оптических характеристик комбинированной системы из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал	66
3.2.2 Изучение возможности энергоуглового анализа в спектрометре из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал	74
4. КОРПУСКУЛЯРНО - ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРОВ С ГЕКСАПОЛЬНО - ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ $U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z)$	79
4.1 Расчет и моделирование электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора при $\mu = 1, \gamma = 1$	79

4.2 Численное моделирование длиннофокусного энергоанализатора на основе гексапольно-цилиндрического поля с организацией защиты рабочего объема от влияния краевых полей	91
4.3 Численное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВИМС – вторично-ионная масс-спектрометрия
ГЗ – гиперболическое зеркало
ГЦП – гексапольно-цилиндрическое поле
ДКЦЗА - двухкаскадный цилиндрический зеркальный анализатор
МЭС – методы электронной спектроскопии
ПЦЗА – параллельный цилиндрический зеркальный анализатор
РФЭС – рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия
СЗ – сферическое зеркало
ТЗЦА – трехэлектродный цилиндрический зеркальный анализатор
ЦЗ – цилиндрическое зеркало
ЦЗА – цилиндрический зеркальный анализатор
ЭОС – электронная оже-спектроскопия

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Диссертация посвящена разработке и оптимизации электронно-оптических схем электростатических энергоанализаторов потоков заряженных частиц.

Актуальность темы. Предметом изучения физики поверхности является исследование элементного состава и расположения атомов на поверхности твердых тел, а также теоретическое и экспериментальное изучение их механических, химических и других свойств. Как и в случае объемных твердых тел, конечной целью исследований является установление взаимосвязи между свойствами, составом и структурой. Поэтому точное определение элементного состава поверхности или поверхностного слоя некоторой толщины является необходимым условием правильной интерпретации экспериментов в области физики поверхности [1].

Число методов исследования поверхности очень велико и неуклонно растет. В настоящее время существует более семидесяти «поверхностных» методов, многие из которых имеют несколько модификаций, различающиеся по своим функциональным возможностям. Данные методы основаны на взаимодействии с поверхностью твердого тела пучков заряженных частиц, что подразумевает создание высокого вакуума при проведении исследований. Методы анализа поверхности позволяют получить информацию о природе частиц, испускаемых с поверхности вещества, их пространственном и энергетическом распределении и их количестве. Данная информация дает возможность установить, что происходит на поверхности во время измерений.

Ведущие современные технологии и прежде всего нанотехнологии определяются явлениями, происходящими на поверхности. Все больший интерес вызывают свойства наноразмерных структур, различного рода наноматериалов, в которых именно поверхность играет важную роль. В настоящее время исследования поверхности твердого тела представляет собой развивающуюся область знаний, имеющей большое значение для физики наноразмерных и молекулярных структур, современного материаловедения, нано- и микроэлектроники, нанотехнологии, физики и химии конденсированного состояния и тонких пленок и т.д.

Для большинства методов анализа поверхности характерна общность ряда свойств. В частности, высокая поверхностная чувствительность всех методов вытекает из того факта, что электроны в области энергий 5-2000 эВ обладают высокой вероятностью неупругого рассеивания. Следовательно, если оказывается, что энергия детектируемых электронов не изменилась при взаимодействии с поверхностью твердого тела, можно быть уверенным, что электроны прошли только через очень тонкий поверхностный слой, и, следовательно, такой метод является поверхностно-чувствительным. Второе обстоятельство связано с тем, что, поскольку поверхностная чувствительность метода основывается на измерении энергии электронов, для большинства из этих методов необходимы анализаторы энергии того или иного вида. Таким

образом, этот компонент соответствующей экспериментальной установки также является общим для большинства методов [2].

Современная нанoeлектроника требует развития методов исследования, позволяющих определять структуру и состав нанобъектов и наносистем. Перспективной базой требуемой диагностики являются методы электронной спектроскопии (МЭС), которые характеризуются нанометровым разрешением по глубине твердого тела. Глубина анализа в МЭС составляет 0,5-2 нм.

Электронная спектроскопия представляет собой один из широко используемых и активно развиваемых в настоящее время методов изучения физико-химических свойств приповерхностной области твердых тел. Развитие МЭС было положено исследованиями К.Зигбана [3]. За годы своего развития они превратились в мощный метод определения состава и электронного строения твердых тел. В основе данных методов лежит анализ по энергии электронов, испускаемых поверхностью исследуемого вещества, под действием внешнего излучения. Электронный спектрометр выделяет из входящих частиц с широким набором энергий и углов, частицы, энергии которых заключены в определенной узкой области. Основным анализирующим элементом спектрометра является энергоанализатор.

Для оже-спектроскопии поверхности как одного из наиболее 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.

подавляющее большинство фокусирующих элементов, используемых в электронной и ионной оптике, создают аксиально-симметричные электростатические и (или) магнитные поля, которые могут быть описаны скалярными потенциалами [4]. Главными задачами электронных приборов являются формирование, фокусировка и отклонение электронных пучков электрическими и магнитными полями. Этой проблемой занимается корпускулярная оптика. Предметом изучения корпускулярной оптики являются семейства траекторий и их свойства [5]. Принципы корпускулярной оптики лежат в основе физической электроники и ее разделов, таких как электронная спектроскопия, масс анализ, нанотехнологии и т.д.

В начале 80-х годов 20-го века анализ существующих приборов показал, что наилучшим на тот момент анализатором по разрешению и чувствительности является цилиндрическое зеркало профессора В.В.Запквары в режиме фокусировки второго порядка по меридиональному углу θ при расположении образца и детектора на оси симметрии [6]. Использование цилиндрического зеркала актуально и на сегодняшний день.

Актуальными проблемами современного спектрального анализа являются задачи, которые необходимо решать в условиях повышенного роста требований к чувствительности обеспечивающего устройства, его разрешающей способности, компактности, а также необходимости пространственного совмещения нескольких методов исследования. Дальнейший прогресс современных технологий, а также развитие нанотехнологий в большой степени

определяется состоянием средств диагностики. Таким образом, энергоанализ пучков заряженных частиц требует дальнейшего усовершенствования существующих или разработки качественно новых корпускулярно-оптических систем путем дальнейшего развития теории.

Обзор наиболее известных последних работ в области корпускулярной оптики показывает, что дальнейшее развитие электронно-оптических схем может быть достигнуто путем разнообразной модернизации и комбинирования известных электростатических зеркал. Научная новизна подходов к созданию систем энергоанализа с необходимыми корпускулярно-оптическими свойствами заключается в использовании неоднородных вдоль оси симметрии электростатических полей.

Целью диссертации является теоретическая разработка и проектирование новых видов светосильных электростатических зеркальных анализаторов с высокими корпускулярно-оптическими параметрами и широкими функциональными возможностями.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Изучение возможности перевода электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» (Институт ядерной физики АН Чешской Республики, г.Ржеж под Прагой) в режим спектрографа.

2. Расчет и анализ электронно-оптических характеристик энергоанализаторов, комбинированных из светосильных цилиндрического и гиперболического зеркал.

3. Исследование электронно-оптических схем на основе гексапольно-цилиндрического поля с высокими электронно-оптическими характеристиками.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовался приближенно-аналитический метод расчета траекторий заряженных частиц в различных гексапольно-цилиндрических полях. Для моделирования энергоанализаторов использованы самые современные пакеты программ, в частности численная программа «Фокус» Рязанского государственного радиотехнического университета для моделирования аксиально-симметричных корпускулярно-оптических систем, а также программные средства MathCAD Professional для решения математических задач различной степени сложности.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Продемонстрирована возможность перевода электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» в режим спектрографа. Полученной модифицированной схемой является конструкция с тремя каскадами и фокусировкой вида «ось-ось». Данная система способна обеспечить высокоточные и экспрессные исследования угловых и энергетических распределений заряженных частиц, эмиттируемых с поверхности исследуемого образца, посредством микроканальной пластины.

2. Впервые рассчитаны энергоанализаторы, комбинированные из цилиндрического и гиперболического зеркал, в которых реализуются схемы угловых фокусировок I и II порядка расходящихся пучков заряженных частиц. Предложена модель спектрометра с энергоугловым разрешением, обладающая

высокой разрешающей способностью, высокой светосилой и углом входа в рабочее поле равным 90° .

3. Проведено численное моделирование электронно-оптических схем энергоанализаторов на основе гексапольно-цилиндрических полей с различными вкладами цилиндрического поля и гексаполя, обладающие высоким качеством угловой фокусировки. Впервые выделен и рассчитан приближенно-аналитическим методом энергоанализатор с угловой фокусировкой близкой к идеальной, обладающий высокими электронно-оптическими параметрами.

4. При пространственном совмещении методов электронной оже-спектроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии необходимы средства с большими расстояниями «образец-анализатор». Выделены схемы длиннофокусных гексапольно-цилиндрических анализаторов. Впервые показана возможность их использования при проектировании длиннофокусного оже-микрзонда для локального анализа вещества.

Практическая ценность работы заключается в разработке конкретных корпускулярно-оптических схем, предназначенных для физико-химического анализа вещества, а также создании систем для электронной оже-спектроскопии.

Обоснованность и достоверность полученных данных подтверждается тем, что траектории заряженных частиц в классических гиперболическом и цилиндрическом полях получены путем точного интегрирования дифференциальных уравнений движения, выведенных путем корректных математических преобразований уравнений поля и с использованием закона сохранения энергии; приближенно-аналитический метод расчета траекторий заряженных частиц в гексапольно-цилиндрических полях дублировался численными методами расчета с использованием программы «Фокус».

Положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что линию фокусов в энергоанализатора типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» можно спрямить путем введения третьего дополнительного внутреннего коаксиального цилиндрического электрода.

2. На основе комбинирования цилиндрического и гиперболического зеркал могут быть построены эффективные электронно-оптические схемы с угловой фокусировкой I и II порядка расходящихся пучков заряженных частиц. Рассчитанная модель спектрометра, допускающая ввод пучка заряженных частиц под углами, близкими к прямому углу, может быть использована для одновременной регистрации энергетических и угловых распределений частиц.

3. Разработанная электронно-оптическая схема энергоанализатора на основе гексапольно-цилиндрического поля с угловой фокусировкой близкой к идеальной, позволяет обеспечить режим работы в условиях высокого разрешения и большой светосилы.

4. Показано, что длиннофокусные анализаторы на базе гексапольно-цилиндрических полей дополненные встраиваемой электронной пушкой могут быть применены для разработки длиннофокусного оже-микрзонда.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научной конференции «Инновационное развитие и востребованность науки в современном Казахстане» при Фонде Первого Президента РК (2009, г.Алматы.); на международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2010» (2010, г.Москва); на XI-й международной научной конференции «Физика твердого тела» (2010, г.Усть-Каменогорск); на 8-ой международной конференции «Charged Particle Optics» (2010, Сингапур); на 10-ом Всероссийском семинаре «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики» (2011, г.Москва); на международной научной конференции «Алдамжаровские чтения-2011», посвященной 20-летию Независимости РК (2011, г. Костанай), на международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию Независимости РК и 15-летию Костанайскому инженерно-экономическому университету им. М.Дулатова «Дулатовские чтения – 2011» (2011, г.Костанай), на международном молодежном научном форуме «Ломоносов-2012» (2012, г.Москва), на 8-ой международной научной конференции, посвященной 40-летию КарГУ им. академика Е.А. Букетова «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (2012, г. Караганда).

Личный вклад автора. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, были получены автором лично под руководством научных консультантов.

Публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, изложены в 24 публикациях, в том числе 1 статья в международном научном журнале «Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena», имеющим по данным информационной базы компании Thomson Reuters импакт-фактор 1.958, а также входящий в базу данных компании Scopus, 6 статей в научных изданиях, рекомендованных Комитетом, 3 статьи в журналах ближнего зарубежья, 1 статья в журнале дальнего зарубежья и 13 публикаций в материалах международных конференций, из них 6 в материалах зарубежных конференций.

Объем и структура диссертации. Структура диссертационной работы определяется задачами, решение которых необходимо для достижения цели диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов, списка использованных источников из 180 наименований и содержит 115 страниц машинописного текста. Работа иллюстрирована 50 рисунками и содержит 9 таблиц.

1 АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ОПТИКИ

1.1 Обзор существующих энергоанализаторов пучков заряженных частиц

Одной из основных задач анализа поверхности является определение качественного и количественного элементного состава поверхности или поверхностного слоя некоторой толщины. Под поверхностью, как правило, понимают часть объема материала толщиной $\sim 1-10$ атомных слоев [1, с.6].

Особое внимание к тонкому приповерхностному слою твердых тел является одной из характерных черт современного материаловедения. Это объясняется тем, что структура и состав поверхности определяют многие физические и химические свойства твердых тел и играют главную роль во многих процессах и явлениях, часто имеющих огромное технологическое значение. Кроме того, наше время часто называют началом нанотехнологической революции. Одной из характерных черт объектов нанонауки по сравнению с обычными макроскопическими телами является резкое увеличение относительной доли атомов, лежащих на поверхности, по сравнению с полным числом атомов системы [7].

Важной деталью экспериментальной схемы является энергоанализатор – устройство, позволяющее определять плотность тока заряженных частиц с энергиями в выбранном интервале от E до $E+\Delta E$. Энергоанализатор позволяет установить то, как заряженные частицы в потоке распределены по энергиям [8]. Принципиальная экспериментальная схема показана на рисунке 1.

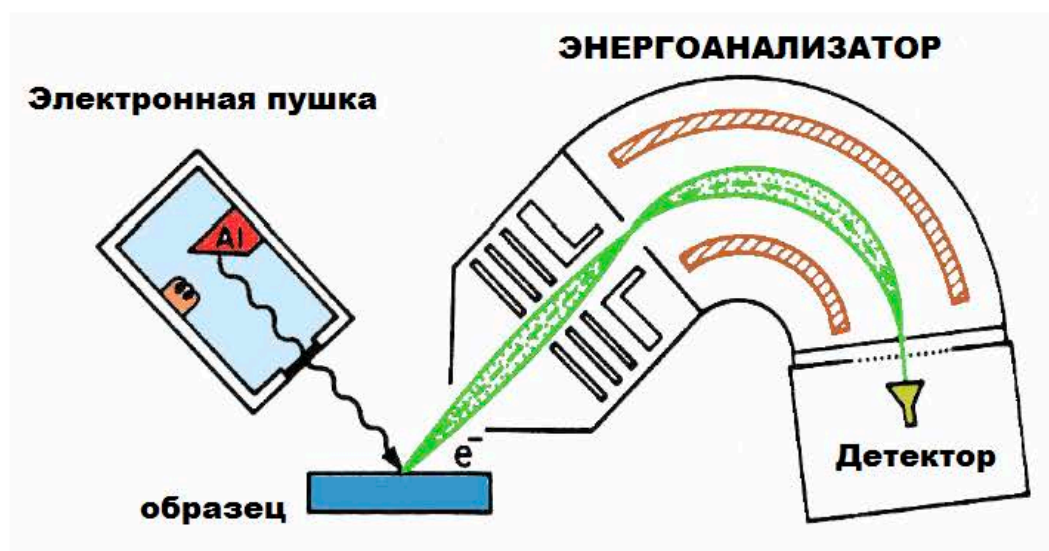


Рисунок 1 - Принципиальная экспериментальная схема с энергоанализатором

В настоящее время имеется множество методов анализа поверхности. Для удовлетворения технологических потребностей постоянно создаются новые методики и приборы. Для целей энергоанализа чаще всего применяются

электростатические приборы с геометрией следующих полей и их суперпозиций: сферическое поле, цилиндрическое поле, гиперболическое поле, однородное поле и т.д. [9].

Энергоанализатор с однородным полем, т.е. плоское зеркало, осуществляет фокусировку в одном направлении. Одной из причин его широкого применения в энергоанализе потоков заряженных частиц является простота конструкции. Принцип действия энергоанализатора основан на использовании дисперсионных свойств однородного электрического поля.

В работе [10] разработан плоский анализатор новой модификации с фокусировкой второго порядка для произвольного входного угла. Предложенный анализатор с небольшим углом входа имеет преимущество при низких значениях напряжения. Анализатор очень полезен для энергоанализа в диапазоне МэВ. В работах [11,12] предложен 45° -ный плоский электростатический энергоанализатор для низкоэнергетической электронной спектроскопии (см. рисунок 2).

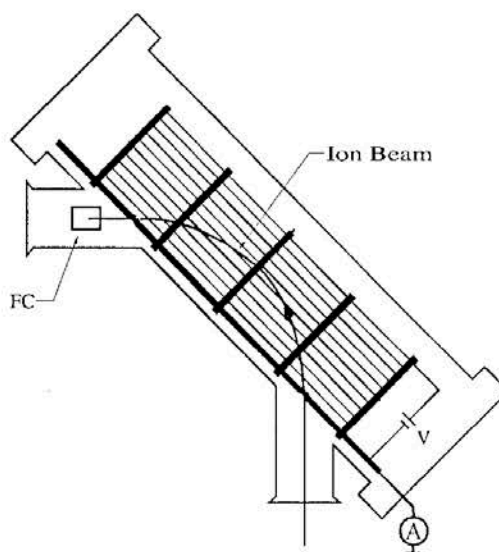


Рисунок 2 - Схема 45° -ного плоского электростатического энергоанализатора

Примечание – использовано из источника [11]

Уникальное устройство – двухкаскадное плоское зеркало, одновременно измеряющее энергии и углы разных заряженных частиц, сформированных в одном пучке, описано в работе [13]. Способность выделять и регистрировать частицы с противоположной полярностью позволяет измерять их одновременно. Получены и подробно обсуждены уравнения для траекторий частиц. Представлены выражения для соответствующего разрешения обнаружения частиц.

Фишковой Т.Я. [14] предложена электростатическая система, предназначенная для получения моноэнергетического электронного пучка. Она состоит из основного фильтра по энергии в виде плоского зеркала с закрытыми торцами и дополнительного плоского конденсатора, компенсирующего

начальный разброс по энергии. Получена аналитическая формула связи напряженностей этих полей. Проведены численные расчеты системы, которые показали, что энергетический разброс в электронном пучке на линии фокусов уменьшился на порядок по сравнению с начальным тепловым разбросом.

Широкое применение получил анализатор пучков заряженных частиц типа цилиндрическое зеркало (ЦЗ). Анализатор имеет высокие электронно-оптические характеристики и сравнительно прост по конструкции.

В работе [15] определены параметры ЦЗ с торцевыми электродами при сканировании поверхности образца тонким первичным пучком. Задача решена численным методом по программам для расчета двумерных задач электронной оптики.

Трубицыным А.А. [16] представлена электронно-оптическая схема энергоанализатора, представляющая собой комбинацию простейших (и технологических) фигур – цилиндров и колец. Анализатор обеспечивает угловую фокусировку второго порядка при $\alpha_0=90^\circ$. Такой угол фокусировки дает возможность построения эффективной диаграммы угловых измерений, а фокусировка второго порядка означает значительное ослабление противоречия, заключенного в требовании одновременно высоких значений светосилы и разрешающей способности, по сравнению со случаем фокусировки первого порядка.

В работе [17] рассчитана схема цилиндрического зеркального анализатора (ЦЗА) для оже-спектроскопии, которая обладает двумя режимами угловой фокусировки. Благодаря этому, могут быть применены два метода в оже-анализе поверхности образца при исследовании.

Работа [18] посвящена разработке компактного цилиндрического отражающего зеркального анализатора для спектрометра рассеяния низкоэнергетических ионов, используемого в вакуумных системах осаждения тонких пленок. Конструкция энергоанализатора подобна эллипсоидальному зеркальному анализатору, состоящему из электростатического отражающего зеркала цилиндрического секторного типа со средним радиусом кривизны 4,0 см и углом сектора 70° , фильтра высоких энергий и двух щелей. Среднее энергетическое разрешение было получено в энергетической зоне 10 эВ и первичной энергии ионов 800 эВ.

В статье [19] описана конструкция параллельного цилиндрического зеркального анализатора (ПЦЗА) с конфигурацией «ось-ось». Анализатор охватывает широкий диапазон энергий в режиме параллельного сбора. Режим фокусировки второго порядка существует в области ограниченного диапазона энергий с высоким энергетическим разрешением. ПЦЗА работает между режимами параллельного сбора и второго порядка.

Целью работы [20] является разработка компактного энергоанализатора с отражающим полем высокого разрешения для измерения энергетического разброса электронных пучков с объемным зарядом. Данный энергоанализатор имеет цилиндрический электрод для предотвращения эффектов расфокусировки, связанных с влиянием пространственного заряда, пучком траекторий, эффектами на диафрагмах и т.д. Моделирование одной частицы

показало, что данный энергоанализатор имеет очень хорошее разрешение для низкоэнергетических электронных пучков в несколько киловольт и с большими углами разброса. Энергоанализатор был протестирован на пучках 2,5 кэВ, 60 мА. Измеренный энергетический разброс сравнен с теоретическими расчетами с учетом двух основных энергетических источников разброса, а именно эффекта Берша и продольного ослабления.

Расчет электронно-оптических свойств модифицированного ЦЗА представлен в работе [21]. Анализатор состоит из двух концентрических цилиндров с коническими торцами, неполные углы которых между 30° и 90° . Показано, что ЦЗА с коническими торцами имеет фокусирующие свойства второго порядка с высокой дисперсией. Анализатор расширяет применения цилиндрических зеркал в атомной физике и физике поверхности, поскольку конические торцы обеспечивают более выгодные геометрические условия для облучения образца, а также для детектирования электронов.

В работе [22] предложено и теоретически исследовано устройство, фильтрующее по энергии пучки заряженных частиц. Оно состоит из цилиндрического полевизатора электрода, в меридиональной плоскости которого расположен плоский заземленный электрод, а по торцам — заземленные диафрагмы, через которые осуществляются вход и вывод пучка. В широком диапазоне изменения геометрии системы рассчитаны параметры для двух случаев: с двойной фокусировкой пучка на плоский электрод и в режиме параллельного переноса пучка.

Исследование оптических свойств 127⁰-го ЦЗА с помощью программы SIMION 3D версии 6.0 проводилось в работе [23]. Анализатор предназначен для использования в экспериментах по рассеянию низкоэнергетических ионов. Зависимость телесного угла приема Ω на плоскости мишени с координатами (x,y) к относительной энергии частицы ε полностью описывает оптические свойства анализатора. Вычислена Ω (x,y) функция из расчетов траектории ионов, эмитированных с разных точек плоскости мишени. Экспериментально определено влияние сферической аберрации на ошибку измерения энергии.

В работе [24] спроектирован ионный спектрометр потерь энергии. Энергоанализатор в приборе состоит из 180⁰-ного цилиндрического конденсатора, оснащенного пластинами Мацуда. Его преимущество в том, что фокусировка может быть достигнуто путем изменения электрического потенциала на пластинах Мацуда, которые расположены на обоих концах цилиндрического конденсатора. С помощью этого метода, энергоанализатор становится эквивалентным обычному сферическому конденсатору, и устраняет краевое поле.

В работе [25] подтверждено экспериментально, что 210⁰-ный ЦЗА с дрейфовым пространством обеспечивает фокусировку второго порядка. Свойства анализатора сильно зависят от краевого поля вблизи входа и выхода из цилиндров.

С целью избежания от вращения крупных источников электронов и детекторов в экспериментах по квантовому рассеянию частиц в работе [26] был разработан прибор, в котором вращение электронного пучка было достигнуто

путем комбинирования трех небольших ЦЗА в последовательности. Первый анализатор неподвижен, а два других вращаются вместе вокруг выходной оси первого цилиндра.

В работе [27] описаны особенности электростатического энергоанализатора цилиндрического типа с целью измерения конечных потерь ионов. Анализатор обеспечивает информацию о плотности распределения ионов в конусной области пространства скоростей.

Работа [28] посвящена описанию схемы электростатического энергоанализатора, позволяющего одновременно регистрировать энергетический спектр заряженных частиц в широком диапазоне энергий и во всем диапазоне азимутальных направлениях. Анализатор подобен ЦЗА, с исключением того, что линейные изменения потенциала применяется в осевом направлении внешнего цилиндра. Анализатор может быть использован в режиме фокусировки второго порядка для анализа узкого диапазона энергий с высоким энергетическим разрешением.

В работе [29] разработан цилиндрический секторный энергоанализатор с высоким напряжением для электронов кинетической энергией до 15 кэВ. Он особенно подходит для рентгеновской и ультрафиолетовой фотоэлектронных спектроскопий, оже-электронной спектроскопии и электронной спектроскопии. Анализатор основан на цилиндрическом секторе с отклонением на 90° . Расстояние щелей 300 мм, входная четырех элементная тормозящая линзовая система расположена на расстоянии 50 мм от образца. Результатом является очень компактная конструкция анализатора, которая легко интегрируется в многоцелевые эксперименты с различной методикой. Низкий уровень шума электроники дает возможность непрерывно сканировать энергии от 0 до 15 кэВ с использованием нелинейных линз. Показаны возможности анализатора в соответствии с разрешением по энергии и трансмиссией с помощью электронной пушки, ультрафиолетовой газоразрядной лампы, и жесткого рентгеновского синхротронного излучения в качестве источников возбуждения.

На основе ЦЗ разработаны множества многокаскадных энергоанализаторов, корпускулярно-оптические параметры, которых превышают одиночные ЦЗ. Так, например, в работе [30] представлена схема электростатического электронного спектрометра для одновременных измерений энергетических и угловых распределений электронов в полном диапазоне углов рассеяния (0° - 180°) с высоким энергетическим разрешением. Первый и второй ступени анализатора состоят из трех частей с цилиндрической симметрией. Корпус анализатора и внутренний цилиндр находятся под потенциалом земли, внешней цилиндр с коническими торцами под отрицательным потенциалом. Первая ступень электронного спектрометра фокусирует электроны, эмитированные вблизи 90° с точечного источника на оси в точку фокуса. Такой угол входа неосуществим в обычном ЦЗА. Далее проходят через вторую ступень, фокусируясь в кольцо. На рисунке 3 представлена схема продольного сечения двухкаскадного электростатического анализатора.

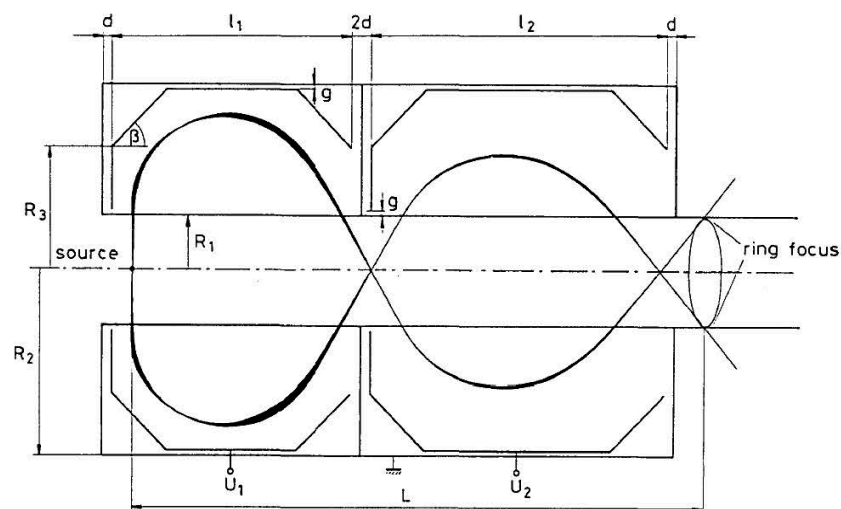


Рисунок 3 - Схема продольного сечения двухкаскадного ЦЗА с несколькими траекториями электронов вблизи 90° входного угла

Примечание – использовано из источника [30]

В статье [31] описана конструкция двухкаскадного ЦЗА. Данный электронный энергоанализатор диаметром менее 1,5 дюйма (30 мм) превосходит по производительности однокаскадный ЦЗА с аналогичным диаметром.

В работе [32] представлен двухкаскадный ЦЗА для спин-поляризованной оже-электронной спектроскопии. Анализатор обладает высокой трансмиссией, небольшой угловой эмиссией электронов и большим фокусным расстоянием. Сочетание энергоанализатора с компактным классическим детектором Мотта обеспечивает оже-спектрометр очень высокой эффективностью.

Работа [33] посвящена разработке миниатюрного двухкаскадного цилиндрического зеркального электронного энергоанализатора (ДКЦЗА) с внешним диаметром 26 мм. ДКЦЗА состоит из экрана для электрического поля, внутреннего и внешнего цилиндров, двух микроотверстий с диаметрами 2,0 мм и электронного умножителя. ДКЦЗА собирается в осесимметричный зеркальный электронный анализатор, разработанный для анализа оже-фотоэлектронной спектроскопии совпадений. Электронно-энергетическое разрешение ДКЦЗА составляет $E/\Delta E = 20$. Это значение выше, чем у миниатюрного однокаскадного ЦЗА ($E/\Delta E = 12$), который использовался в предыдущем анализаторе оже-фотоэлектронной спектроскопии совпадений.

В работе [34] описан новый тип электронного энергоанализатора для оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Он состоит из трех коаксиальных цилиндрических электродов для разделения вторичных электронов, эмитированных с возбужденной подложки. Кратко описаны основы, включающие траектории электронов внутри анализатора, представлены детали вычислений геометрических параметров конструкции. Расстояние от образца до изображения составляет 200 мм, константа анализатора равна 2, теоретическое энергетическое разрешение 0,03%, угол входа в анализатор $33^\circ 55' \pm 6^\circ$. Используя построенный анализатор в сочетании сканирующей

электронной пушкой со скользящим наклоном 15^0 , был записан оже-пик углерода C-272 эВ для химически травленного Si (1 1 1) субстрата в режиме E от N (E), а затем численно дифференцированы $EdN(E)/dE$, чтобы проверить возможность построения оже-спектрометра.

В работе [35] описана схема и конструкция электронного энергоанализатора для изучения электронных процессов в атомах и молекулах твердых тел. Анализатор состоит из 180^0 – го полусферического дефлектора и пяти входных оптических элементов. Фокусирующие характеристики анализатора были исследованы с помощью программы «SIMION» моделирования траекторий электронов. Входная система линз в полусферический дефлектор разработана для обеспечения высокой собирающей способности низкоэнергетических электронов. Система линз состоит из трех линз, ускоряющего или замедляющего объектива, входной и выходной щелей. Входное и выходное щели системы линз имеют фиксированные диаметры 2 мм, что позволяет снизить абберации в поле.

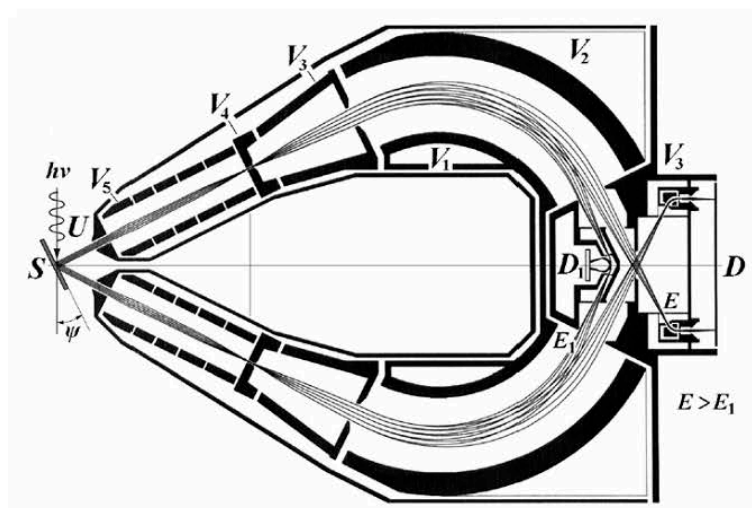
Сферическое зеркало (СЗ) относится к корпускулярно-оптическим системам, обеспечивающим фокусировку в двух направлениях. Благодаря своим высоким параметрам этот тип анализатора получил широкое применение в различных областях исследований. Ряд фирм выпускает электронные спектрометры, в которых анализатором является СЗ.

Времяпролетные характеристики электростатического энергоанализатора потоков заряженных частиц типа СЗ в условиях идеальной угловой пространственной фокусировки для точечного источника, расположенного на оси симметрии спектрометра исследованы в работе [36]. Показано, что время движения частицы от источника до идеального фокуса, также расположенного на оси, в первом приближении не зависит от направления вылета вблизи нормали к оси. Таким образом, режим фокусировки по времени пролета позволит эффективно использовать СЗ в МЭС, в котором регистрируется отдельно каждый акт эмиссии.

В работе [37] разработан новый тип полусферического электронного энергоанализатора для угловой и спин-разрешающей фотоэлектронной спектроскопии. Анализатор позволяет получить спектры с угловым разрешением путем записи двумерным детектором, и параллельно используя мини-поляриметр Мотта, определяющий спин частицы. Обсуждены общие соображения схемы и технические решения. Представлены результаты тестов от поверхности Au.

В статье [38] представлена схема оригинального прибора для измерений рентгеновской фотоэлектронной дифракции и рентгеновской фотоэлектронной голографии. Компактный электронный спектрометр характеризуется высокой чувствительностью, а также высокими энергетическим и пространственным разрешениями. Конструкция основана на комбинации осесимметричного 90^0 -го секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка и полой конической замедляющей иммерсионной линзы. Диапазон энергий фотоэлектронов изменяется от 0 до несколько тысяч электрон-вольт, таким образом, анализатор может быть использован для

исследований валентных и основных электронных уровней. На рисунке 4 показана схема энергоанализатора на основе комбинации осесимметричного 90° – го секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка и полой иммерсионной замедляющей конической линзой. Энергетическое разрешение анализатора составляет $\frac{\Delta E}{E} = 10^{-4}$. Это разрешение может быть достигнуто в экспериментах с угловым разрешением $0,25^\circ$ для электронов, эмитированных с протяженной области образца до 4мм^2 или более, в диапазоне начальных полярных или азимутальных углов до 60° . Кроме того, разрешение может быть достигнуто в спектромикроскопическом режиме с телесным углом $0,5$ ср.



V_1 , V_2 - потенциалы сферического дефлектора, V_5 , V_4 , V_3 - потенциалы замедляющей системы

Рисунок 4 - Схема энергоанализатора на основе комбинации осесимметричного 90° секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой 2-го порядка и полой иммерсионной замедляющей конической линзы

Примечание – использовано из источника [38]

В работе [39] исследованы характеристики анализатора, состоящего из двух 180° -ных полусферических отклоняющих анализаторов, расположенных последовательно и оснащенных многоканальным детектором. Энергетическое разрешение и время прохождения для нерелятивистских электронов были вычислены с помощью численных методов. Рассчитаны оптимальный размер и форма входной щели по отношению к многоканальному детектору. Электронные энергетические спектры были симулированы мультidetектором с 100 дискретными каналами, чтобы показать возможность "быстрого счета" анализатора. На рисунке 5 показана схема двухкаскадного анализатора. Здесь V_1 и V_2 - потенциалы внутреннего и внешнего полусфер соответственно со

средним радиусом R_0 . Области I и IV являются свободными полями, а в областях II и III поле $1/r^2$ поддерживается потенциалами. Электроны входят через входную щель с шириной W и собираются детектором после отклонения через полусферические сектора.

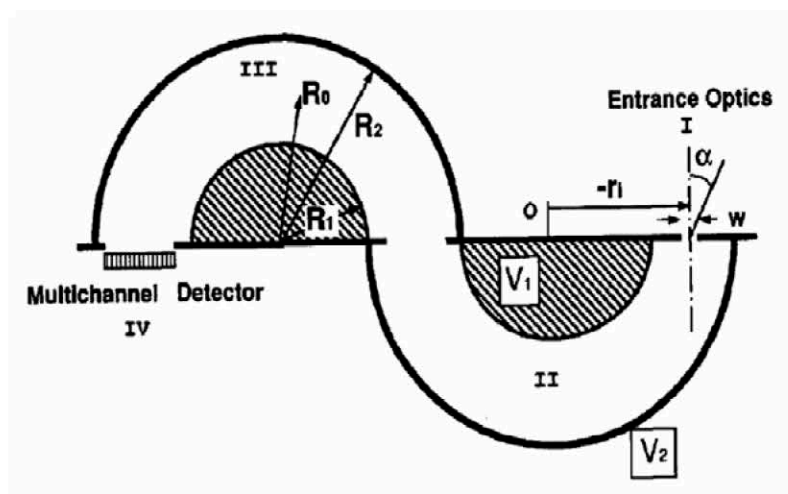


Рисунок 5 - Схема двухкаскадного полусферического анализатора

Примечание – использовано из источника [39]

К числу светосильных электростатических зеркал относится также гиперболическое зеркало (ГЗ), схемы фокусировки которого были рассмотрены Зашкварой В.В. и др. в [40].

В работе [41] предложен гиперболоидный масс-спектрометр с анализатором на ограниченной плоскости $z=0$ трехмерной ионной ловушке. На основе численного моделирования электрического поля и процесса сортировки заряженных частиц построены массовые пики для различных режимов работы масс-анализатора. Полученные результаты являются основой для создания гиперболоидного масс-спектрометра с простой электродной системой и высокой разрешающей способностью.

В статье [42] описан новый тип электростатического анализатора заряженных частиц, способного параллельно детектировать большой диапазон кинетических энергий. Основной целью является одновременное детектирование электронов, рассеянных с поверхности и имеющих энергию от нескольких десятков эВ до 2000 эВ. Был построен прототип, приближенный гиперболическому отражающему полю. Энергетическое разрешение составляет несколько эВ и эффективность сбора 0.05 % от 2π ср. Значительное усовершенствование во времени получения спектров, дают много возможностей для оже- и фотоэлектронной спектроскопий.

Фокусировка второго порядка является свойством электронного энергоанализатора дисперсионного типа, поскольку он обладает большим приемом углов или, напротив, высоким энергетическим разрешением [43]. Получены условия фокусировки второго порядка для гиперболического анализатора, позволяющего собирать параллельно большой диапазон энергий,

что делает его пригодным для анализа поверхности, например, в оже-спектроскопии.

Сравнительно новый тип электростатических энергоанализаторов с угловым разрешением образует анализатор, состоящий из конической электростатической призмы и позиционно-чувствительного детектора для фотоэлектронной спектроскопии [44]. Характеристики анализатора были проверены путем измерения фотоэлектронных спектров Ag с использованием гелиевой разрядной лампы. Достигнуто угловое разрешение 3° для энергии $E=5,6$ эВ. Лучшее энергетическое разрешение $\Delta E/E = 0,043$ при $E = 1,4$ эВ.

В работе [45] представлена схема параллельного электронно-магнитного коробчатого анализатора, в котором энергия обнаружения варьируется от 50 эВ до 2500 эВ. Результаты моделирования показали, что анализатор обладает средним относительным энергетическим разрешением 0,33% (минимум на 0,147% и максимум 0,622%) в случае плоской горизонтальной детектирующей пластины, расположенной на достаточном удалении от оси основного пучка электронов для полярного углового разброса $\pm 3^\circ$. В анализаторе осуществляется фокусировка второго порядка (или выше). Анализатор достаточно мал, что предполагает функционирование его в качестве дополнения внутри камеры образца сканирующих оже-электронных и электронных микроскопов. Размеры схемы анализатора 90 мм в длину и 40 мм в высоту.

В статье [46] описана схема оригинального электростатического «двойного тороидального» электронного энергоанализатора с высокой трансмиссией. Двойной тороидальный анализатор позволяет одновременно измерять кинетическую энергию и угловое распределение электронов с высоким разрешением и высокой светосилой посредством двумерного позиционно-чувствительного детектора. Точная форма электродов выводится аналитически, а также с помощью численных расчетов траекторий электронов.

Описанный в работе [47] тороидальный электростатический анализатор предназначен для рассеяния среднеэнергетических ионов для структурного анализа поверхностей. Данный анализатор обладает широким межэлектродным расстоянием 16 мм и энергетическим диапазоном 10% от энергии передачи при постоянном значении напряжения. Анализатор установлен горизонтально на поворотном столе и принимает ионы, рассеянные четко определенными углами. Чтобы получить хорошее энергетическое разрешение, использована система счета фотонов (PIAS, Hamamatsu Photonics) с пространственным разрешением 40-50 мм, в сочетании с трехступенчатой микроканальной пластиной. Электрические поля в тороидальном спектрометре, и в том числе рассеянное поле были рассчитаны методом конечных элементов. Траектории электронов через анализатор были рассчитаны с использованием метода Монте-Карло. Таким образом, были определены оптимальные условия геометрии и размеры входной и выходной щелей.

В работе [48] предложен новый зеркальный аксиально-симметричный электростатический энергоанализатор с внешним тороидальным электродом. Тороидальная геометрия обеспечивает хорошие фокусирующие свойства

анализатора и таким образом позволяет достичь высокого углового приема с высоким энергетическим разрешением. Найдены фокусирующие свойства анализатора, когда форма внешнего электрода приближена простому цилиндрическому и коническому поверхностям. Исследованы различные режимы работы тороидального зеркального анализатора, в том числе его использование в качестве части многоступенчатого устройства. На рисунке 6 показаны фокусировки второго порядка типа «ось-ось» и «ось-кольцо» в тороидальном зеркальном анализаторе.

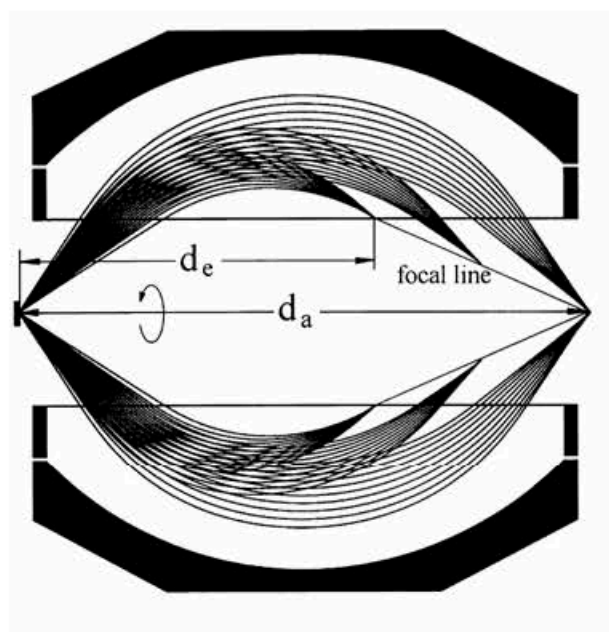


Рисунок 6 - Фокусировки второго порядка типа «ось-ось» и «ось-кольцо» в тороидальном зеркальном анализаторе

Примечание – использовано из источника [48]

Тороидальный энергоугловой фотоэмиссионный спектрометр описан в работе [49]. Прибор обладает мультиобнаружением по энергии и углу, способствуя быстрому измерению фотоэмиссии по всей полусфере. Прибор идеально подходит для исследования зонной структуры и картографирования поверхности Ферми с использованием фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением.

В работе [50] предложены конструкции и проведено моделирование ионно-оптических систем с промежуточной фокусировкой и параллельным выходом ионного потока, предназначенные для совместного использования с квадрупольным фильтром масс с целью улучшения его аналитических характеристик.

Применение в электронной оптике нашла электростатическая линза, любое сочетание электродов которой, формирует электростатическое поле с вращательной симметрией и позволяет, таким образом, заряженным частицам двигаться в поле вдоль оси симметрии.

С учетом интегрирования в двойной тороидальный электронный энергоанализатор для измерений оже-электронных и ионных совпадений в работе [51] разработана четырехэлементная коническая электронная линза. Расчет дизайна линзы с использованием численного моделирования траекторий электронов полностью проведен с точки зрения анализа электронов с высокой разрешающей способностью в режиме мультисовпадений. Описаны дизайн, конструкция, и экспериментальные характеристические этапы данной электронно-оптической системы. Особое внимание уделено важности третьего поколения источников синхротронного излучения при проведении таких экспериментов мультисовпадений.

В работе [52] представлены результаты компьютерного моделирования энергоанализирующих систем, использующих в сочетании полые электростатические линзы и различные конфигурации аксиально-симметричного секторного сферического дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка, образующих системы вида «ось-ось», «ось-кольцо», «кольцо-ось», «кольцо-кольцо». Показано, что сочетание полых иммерсионных линз с системами сферического дефлектора с фокусировкой второго порядка обеспечивает высокую эффективность этих систем в спектроскопии заряженных частиц высокого энергетического разрешения. Разделение частиц по энергии происходит в дефлекторе, где энергия частиц минимальна и релятивистское смещение траекторий отсутствует, благодаря чему шкала энергий спектрометра абсолютно линейна и ее погрешность определяется только погрешностью управляющих электростатических потенциалов. На основе исследованных систем возможно построение компактных светосильных спектрометров, обладающих разрешающей силой по энергии в диапазоне от нескольких сотен до десятков тысяч эВ.

С целью увеличения интенсивности пучка заряженных частиц теоретически исследована [53] электростатическая линза из трех коаксиальных цилиндров, которая фокусирует в одной точке приосевые пучки (за счет осесимметричной линзы), а также удаленные от оси пучки (за счет коаксиальной цилиндрической линзы). Численно рассчитаны параметры такой комбинированной линзы. Определен выигрыш в интенсивности пучка по сравнению с широко используемой одиночной осесимметричной линзой.

Работа [54] посвящена расчету времяпролетных свойств системы, состоящей из последовательно расположенных зеркал с двумерными электростатическими полями, имеющих общую плоскость симметрии. Найдены условия времяпролетной фокусировки по углу расхождения пучка заряженных частиц и энергетический разброс. Рассчитаны схемы времяпролетного спектрометра, состоящего из цилиндрических зеркал с внешним и внутренним отражением пучка.

В работе [55] представлен новый времяпролетный фотоэлектронный энергоанализатор, в котором используется электростатическое поле для отражения и фокусировки электронов. С помощью высококачественной эллипсоидальной сетки, фотоэлектроны могут быть собраны с высокой эффективностью и сфокусированы на детекторе. Рассмотрены проблемы

пространственного заряда и протяженных источников электронов в эллипсоидальном зеркальном анализаторе. Предложенный спектрометр анализирует одно- и многофотонные процессы ионизации и работает в широком диапазоне энергий. Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой эффективности сбора. Получены спектры при вакууме менее 10^{-7} Торр.

Конструкции времяпролетных масс-спектрометров для исследования элементного состава газовых потоков, пылевых частиц и микрометеороидов описаны в работе [56]. Расчет параметров масс-спектрометра основан на определении закона распределения потенциалов на формирующих электрическое поле электродах.

Для повышения скорости и чувствительности tandemного масс-спектрометрического анализа в работе [57] предложено использовать tandem из двух времяпролетных анализаторов в принципиально новом режиме «вложенных времен», позволяющем проводить параллельный анализ фрагментных спектров для ионов в рамках одного цикла разделения в первом «медленном» анализаторе. Для реализации метода предложен «медленный» времяпролетный анализатор нового типа, сочетающий поперечное удержание ионного пучка низких энергий в периодических линзах с многократным отражением ионов между планарными бессеточными зеркалами. Схема позволяет значительно увеличить эффективную длину ионной траектории, одновременно сохраняя возможность анализа полного диапазона масс и обеспечивая высокий порядок времяпролетной фокусировки по энергии ионов. Расчеты и экспериментальные исследования на прототипе анализатора выявили его высокое пропускание (не менее $6 \text{ мм} \times 1,5^\circ$ в каждом из поперечных пучку направлений), хорошую разрешающую способность (более 5000) и широкий (6 порядков величины) динамический диапазон.

В работе [58] предложен времяпролетный электронный энергоанализатор, работающий с частотой повторения 80 МГц. Анализатор обладает разрешением по энергии 40 мэВ для электронов с энергией 3 эВ. Предел энергетического разрешения зависит от времени срабатывания детектора или временного разрешения. В настоящее время детектор с временным разрешением 100 пс обладает энергетическим разрешением менее 1 мэВ для электронов 200 мэВ. Он обеспечивает высокую частоту повторения времяпролетного энергоанализатора.

В работе [59] разработана и построена модель электростатического спектрографа для энергетического анализа заряженных частиц. Прибор основан на пяти каскадном цилиндрическом зеркальном анализаторе. Результаты тестирования согласуются с ранее рассчитанными электронно-оптическими характеристиками спектрографа. Заряженные частицы с энергиями в пределах 11,5% интервала средней кинетической энергии могут быть обнаружены одновременно с инструментальным разрешением 0,6%.

В работе [60] найден оптимальный режим работы плоского магнитного зеркала с однородным полем, при котором за счет фокусировки второго порядка повышается светосила прибора. При этом в отличие от известного масс-спектрометра с полукруговой фокусировкой источник и приемник

находятся вне поля. Для работы в режиме спектрографа определены координаты линии фокусов, на которой следует расположить детекторы.

В работе [61] численно исследованы условия фокусировки второго порядка в конических системах. Рассмотрена угловая фокусировка второго порядка для систем с совпадающими вершинами, как функция относительной энергии электрона. Представлены соответствующие зависимости при различных значениях половины угла внутреннего конуса. Представлена угловая фокусировка второго порядка как зависимость положения точечного источника на оси симметрии от половины угла конуса для систем с параллельными образующими. Обсуждена возможность достижения фокусировки второго порядка в конечно-размерных конусных системах. Даны электронно-оптические схемы для данных приборов.

Работа [62] посвящена расчету электростатического спектрографа на основе энергоанализатора типа усеченный цилиндр в широком диапазоне изменения его параметров. Найдено положение линии фокусов при энергетическом разбросе в пучке, отличающемся на порядок. Определены линейная и удельная дисперсии по энергии. Проведено сравнение с широко распространенным спектрографом из двух плоских электродов.

В статье [63] представлена новая схема электростатического электронного анализатора, которая характеризуется высоким энергетическим разрешением и высокой эффективностью сбора фотоэлектронов, происходящих из субмикронных областей. Анализатор использует оригинальное электростатическое зеркало с низким значением абберрации для сбора электронов, а также тормозящие полые цилиндрические линзы и полусферический энергоанализатор. Обсуждены возможные модификации анализатора. Общая схема энергоанализатора показана на рисунке 7. Пучок выходит из дефлектора вдоль образующих поверхности цилиндра, затем тормозится четырьмя электродами полой линзы, состоящей из конических и цилиндрических коаксиальных электродов, между которыми создается тормозящее продольное электростатическое поле. Эта линза выполняет два действия. Во-первых, тормозит пучок так, чтобы энергия передачи в полусферическом анализаторе остается небольшой, его энергетическое разрешение высокое. Во-вторых, он уменьшает угловой разброс в пучке. Действительно, сбор дефлектора сводится к какой-то степени углового разброса в пучке в полярном направлении (от 22° на входе, 13° на выходе). Этот разброс по-прежнему слишком велик для полусферического дефлектора для достижения высокого энергетического разрешения. Иммерсионная линза далее уменьшает этот разброс на 8° , что приводит к уменьшению кинетической энергии электронов до 80 раз. Неизбежным следствием из этих двух действий является линейное увеличение изображения до десяти раз на выходе линзы. Однако это увеличение не имеет значения, поскольку ширина кольцевого изображения на входе линзы мала по сравнению фокусирующими свойствами дефлектора. В этом случае радиальная ширина изображения на выходе из линзы определяется угловой абберацией линзы.

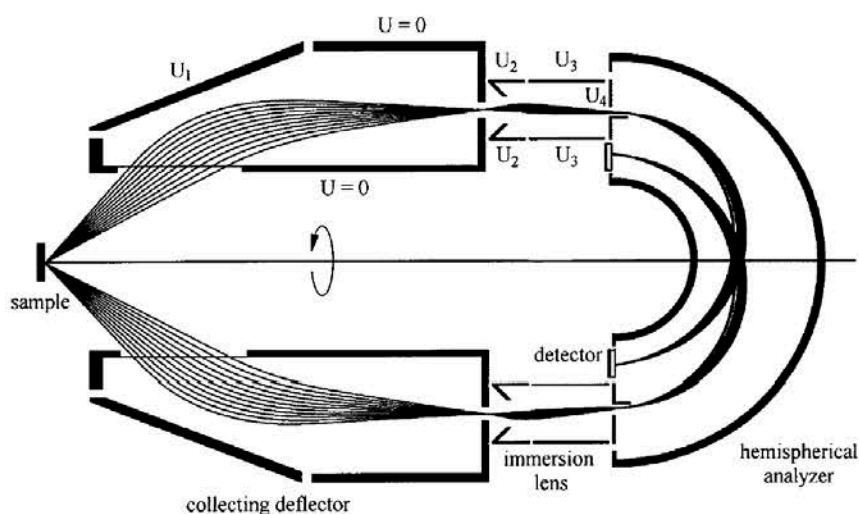


Рисунок 7 - Конфигурация энергоанализатора с высокой трансмиссией, состоящего из полых коаксиальных цилиндрических линз и полусферического дефлектора

Примечание – использовано из источника [63]

В применениях, не требующих очень высокого энергетического разрешения, основной полусферический дефлектор может быть заменен на более простой зеркальный анализатор, показанный на рисунке 8 [63, с.1654].

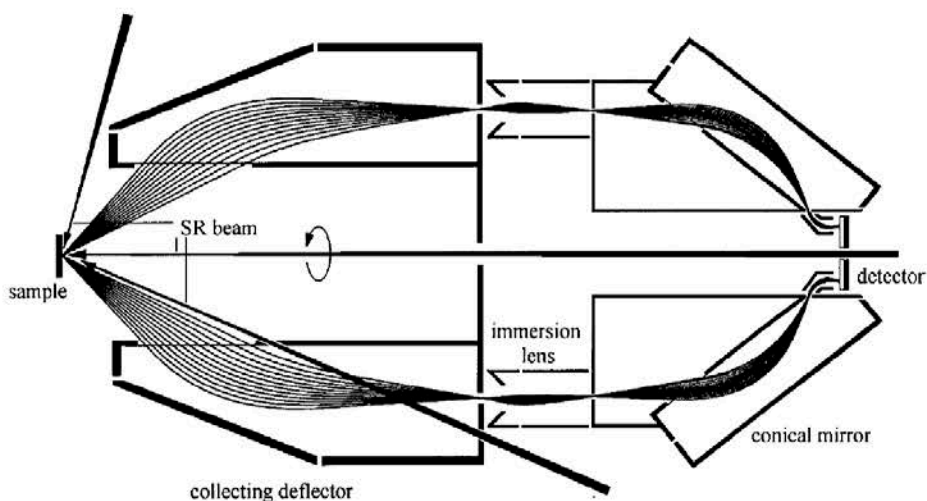


Рисунок 8 - Энергоанализатор с высокой трансмиссией, состоящий из полых коаксиальных цилиндрических линз и основного конического зеркального анализатора

Примечание – использовано из источника [63]

Анализаторы, работающие в многоканальном режиме регистрации частиц, привлекательны своей способностью - использовать энергию гораздо эффективнее, чем анализаторы с последовательным (по времени) диспергированием. Они работают по принципу одновременного измерения

нескольких спектров, что позволяет использовать их для экспрессного одновременного многоэлементного анализа.

Новый параллельный анализатор заряженных частиц с многоканальным детектированием по энергии и углу описан в статье [64]. Одновременное мультисканальное детектирование обоих этих переменных достигается путем использования двумерного позиционно-чувствительного детектора. Прибор устроен так, чтобы информация по углу извлекается из азимутальной координаты, а энергии от радиальной координаты каждой регистрируемой частицы. Прибор основан на оригинальной схеме "ящик Бесселя", разработанной Алленом и ее коллегами. Рассмотрены и оценены общие теоретические принципы, сообщены результаты конкретного устройства, изготовленного для использования в экспериментах ультрафиолетовой фотоэлектронной фотоионных совпадений с угловым разрешением.

В работе [65] представлены конструкция, результаты моделирования и тестирования нового дисперсионного многоканального анализатора для вторичных электронов. Благодаря экспериментальному разрешению в 50 мВ и постоянной спектрометра этот анализатор очень хорошо подходит для измерений напряжений в интегральных схемах. Анализатор также может быть использован для полного разделения вторичных и отраженных электронов в режиме изображения. Параллельное детектирование полосы вторичного спектра электронов шириной в 20 эВ может быть использовано в будущем для получения характеристических данных материалов при низких энергиях <2 кэВ первичных электронов.

Многоканальный цилиндрический отражающий электронный энергоанализатор, предназначенный измерять слабые характеристические сигналы от спектров потерь энергии электронов, описан в работе [66]. Анализатор обладает почти идеальным краевым полем, и его разрешение и дисперсия по энергии характеризуются как функция энергии, которая решается численно уравнением движения электронов в идеальном цилиндрическом электрическом поле. Числовые результаты для радиальной координаты электронов на детекторе являются функцией входной координаты, угла и энергии, приближенные полиномам второго порядка. Эффективность детектирования анализатора в 100-150 раз лучше, чем в эквивалентном приборе с одноканальным режимом, но ограниченная трансмиссия энергии системы увеличивающих линз, понижала это фактор приблизительно в 2 раза.

В работе [67] предложен электростатический многоканальный дефлектор с фильтрацией заряженных частиц по энергии, образованный цилиндром с закрытыми торцами, по продольной оси которого расположен нитевидный электрод. Найдено распределение потенциала такой системы в аналитическом виде. Рассчитаны параметры системы при впуске и выводе пучка через ее заземленные торцы. Благодаря малому по сравнению с длиной окружности цилиндра размеру пучка в азимутальном направлении предлагаемая система хорошо сочетается с 1-4 канальным динамическим монопольным масс-спектрометром для отклонения пучка в его регистрирующее устройство.

В статье [68] обсужден электронный энергоанализатор с цилиндрическим симметричным электростатическим полем, предназначенным для экспрессного оже-анализа. Спроектирован и построен прибор. Оценены наилучшие параметры анализатора, а затем экспериментально проверены.

Новый тип электронного энергоанализатора для быстрого получения спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и рассчитанный на эксплуатацию с давлением 10^{-5} Торр предложен в работе [69]. В предложенном анализаторе используются сферические тормозящие сетки в сочетании пост-монохроматором для достижения полосо-пропускающей способности, сохраняя при этом высокую трансмиссию тормозящей сетки обычного анализатора. Целью моделирования является изучение взаимодействия между тормозящей сеткой и пост-монохроматором. Определено, что ключевыми факторами в производительности анализатора являются рассеяния электронов на тормозящей сетке и на краевых электрических полях. На основе результатов моделирования был построен и испытан электронный энергоанализатор с использованием образцов из золота и тонких пленок из полистирола. Проведено сканирование с шириной 20-эВ за 100-200 с разрешением 1,0 эВ.

Обычно использование физических ограничителей (например, щели и диафрагмы) на входной и выходной плоскостях электростатического электронного энергоанализатора типа дефлектора часто вносит нежелательные искажения в «идеальном» эквипотенциальном распределении и уменьшает угол отклонения [70]. В работе исследовано влияние физических ограничителей и пластин Иоста на рассеянное поле в стандартном полусферическом энергоанализаторе с помощью программы моделирования траекторий электронных пучков «SIMION». По балансировке эффекта краевого поля из-за физических ограничителей с пластинами Иоста, продолжена коррекция схемы, предложенной ранее Иостом. Данная схема коррекции имеет преимущества простоты конструкции.

В работе [71] предложен электронный энергоанализатор, одновременно анализирующий в широком диапазоне энергий. В нем, электроны входят через высокопроницаемую щель в относительно однородное магнитное поле, где проходят винтовые траектории. Затем они проходят через вторую щель и фокусируются на детектор. Их энергии связаны с азимутальным вращением в поле, которое может быть определено из регистрации детектором. На примере показано, что энергии, отличающиеся в 20 раз, могут быть проанализированы одновременно с разрешением около 1% от начальной энергии. Другой пример показал, что схема способна собирать электроны с энергией 500 эВ из источников небольшого размера и разрешать их до 0,6 эВ.

В работе [72] разработан электронный энергоанализатор с угловым разрешением и новой конструированной входной системой линз. В этой системе линз, угловое разрешение достигается путем использования плоской дифракционной щели. Используя эту систему, легко осуществляется высокое угловое разрешение и высокая трансмиссия в измерениях для фотоэлектронной дифракции. Кроме того, угловое разрешение легко определяется размерами плоской дифракционной щели. Для того, чтобы оценить этот анализатор, были

измерены картины рентгеновской фотоэлектронной дифракции с MgO (001) и CaF_2 (111).

В статье [73] теоретически исследован электростатический анализатор, один из электродов которого наклонен, а другой прямой по отношению к оси пучка. Этот тип анализатор может быть использован при изучении распределения заряда в пучке, с разрешением лучше, чем у обычной геометрии параллельной пластины.

В работе [74] описан принцип работы универсальной установки для измерения статических параметров высокоинтенсивных электронных пучков, основанной на регистрации переходного излучения, возникающего при падении на металлическую мишень ленточных и аксиально-симметричных пучков. Приведены схемы регистрации излучения, описаны особенности методик измерений в зависимости от конфигурации пучка, впервые представлена конструкция анализатора ленточных пучков электронов. Работоспособность установки подтверждена результатами эксперимента и численного расчета.

Для регистрации низкоэнергичных заряженных частиц в работе [75] предлагается новый тип электростатического анализатора, названного авторами сегментоидным. Определена напряженность поля между его пластинами и рассмотрены основные характеристики - энергогеометрический коэффициент и кривые пропускания по энергии и входным углам - малогабаритного спектрометрического модуля, разработанного на основе сегментоидного анализатора и детектора (вторичного электронного умножителя ВЭУ-7). Расчетное значение энергогеометрического коэффициента модуля хорошо согласуется с экспериментальным, полученным при градуировке.

1.2 Методы расчета систем энергоанализа пучков заряженных частиц

Улучшение характеристик современных электронных спектрометров ограничено предельными параметрами используемых в них корпускулярно-оптических систем. Совершенствование последних возможно модернизацией имеющихся корпускулярно-оптических систем, применением дополнительных элементов корпускулярно оптики; разработкой новых систем, обладающих улучшенными электронно-оптическими характеристиками и т.д.

Наиболее эффективным при синтезе корпускулярно-оптических систем оказывается подход, реализующий постановку и решение обратных задач корпускулярной оптики. Этот подход требует применение аналитических или полуаналитических методов расчета корпускулярно-оптических систем, в том числе метод оптимального согласования элементов. В работе [76, 77] удалось решить обратную задачу оптики – по заданным электронно-оптическим параметрам пучка заряженных частиц описать поля, формирующее этот пучок.

Непрерывно растущие требования, предъявляемые современным экспериментом к приборам и средствам энергоанализа, стимулируют создание и разработку методов расчета, изучения параметров и предложения по новым классам корпускулярно-оптических систем для применения на практике.

В ряде работ, выполненных под руководством В.В.Зашквары, были применены электростатические осесимметричные мультиполя для решения по-новому проблемы синтеза анализатора дефлекторного типа с отклоняющим полем [78-80]. Предложены новые схемы секторных анализаторов с улучшенными характеристиками. Рассчитаны формы отклоняющих электродов. Метод разделения оператора к решению волнового уравнения применен в работах [81-83]. В цилиндрической системе координат получены решения, описывающие эволюцию полей со структурой круговых мультиполей. В работе [84] построен нелапласов круговой мультиполь и рассмотрена принципиальная возможность корректирующего воздействия его на угловую фокусировку электростатического анализатора дефлекторного типа. В работе [85] решена внешняя краевая задача Дирихле на основе круговых мультиполей в цилиндрических координатах. Рассчитан ряд мультипольно-цилиндрических полей. Метод расчета мультипольных-цилиндрических полей, на основе решения задачи Дирихле в цилиндрической системе координат предложен в работе [86].

В работе [87] предложен метод, использующий разложения потенциала по неприводимым представлениям группы симметрии порождающих элементов системы. Решена граничная задача для мультипольных систем с плоскими пластинчатыми электродами для случая группы симметрии C_{nv} . Получено квадратурное выражение для потенциала поля таких систем. Найдены условия, накладываемые на потенциалы электродов, при которых такое решение возможно. Приведены результаты расчета распределения потенциала в некоторых конкретных системах.

В работах [88, 89] был предложен приближенно-аналитический метод расчета траекторий заряженных частиц в аксиально-симметричном зеркале с мультипольно-цилиндрическим полем. Данный подход позволяет при разработке высокоразрешающих зеркальных анализаторов определить их электронно-оптические характеристики.

Новый класс осесимметричных Лапласовых потенциалов с кольцевой особенностью, описываемых элементарными функциями был предложен в работе [90]. Здесь обсуждены возможности применения этого класса в задачах синтеза энергоанализирующих систем и линз. Приведены эквипотенциальные портреты электрических полей с кольцевыми особенностями. В работе [91] выведены общие формулы реконструкции двумерных лапласовых полей по заданным характеристикам фокусировки и дисперсии в плоскости симметрии. Определена электродная конфигурация энергоанализатора с идеальной фокусировкой веероподобного пучка, найдены параметры плоских траекторий, их форма, энергетическая дисперсия.

В работе [92] рассмотрен синтез полевых структур с коническими эквипотенциалами на базе аналитического представления Донкина. Установлена иерархия таких структур, приведены примеры эквипотенциальных портретов и решена задача Коши для симметричных полей. В работе [93] исследованы электронно-оптические характеристики некоторых систем этого

класса, перспективных для применения в устройстве энергоанализаторов и монохроматоров.

В работе [94] развит новый подход к определению оптимальных электронно-оптических сред, в которых можно эффективно реализовать идею электронного (ионного) спектрографа. За основу взяты электростатические поля с лапласовым потенциалом, подчиняющимся условию однородности Эйлера. Принцип действия спектрографов с такими полями связан со специальным свойством подобия изоэнергетических семейств траекторий с разными энергиями в условиях однородности. Для построения искомых полей предлагается новый способ аналитического представления, в котором базовым является аппарат комплексного представления Донкина для конусовидных полей. Разработанные алгоритмы позволяют строить в элементарной форме однородные потенциалы в широком классе, в котором классические шаровые и сферические функции являются только частными случаями. На этой базе ставится и решается в общем виде в замкнутой аналитической форме задача Коши для однородных потенциалов с плоскостью симметрии. Приводится ряд конкретных структур этого ряда.

В работе [95] рассмотрены новые аналитические связи между осесимметричными и планарными лапласовыми потенциалами, на их основе построены эффективные и компактные алгоритмы решения задачи Коши для осесимметричных электрических полей в областях, содержащих ось симметрии. Приведены оценки точности полученных приближений. В работе [96] развит новый аналитический способ построения широких классов трехмерных лапласовых потенциалов, допускающих замкнутое представление в элементарных функциях. Эти классы особенно полезны в проблемах синтеза электронно-оптических устройств на базе обратных задач динамики частиц, когда возникает некорректная задача Коши для уравнения Лапласа, связанная с процедурой аналитического продолжения потенциала с плоскости в пространство. В статье [97] даны новые классы мультипольных электрических и магнитных полевых структур, на основе которых возможен эффективный синтез новых корпускулярно-оптических элементов.

В статье [98] предложена модель потенциала для описания электрического поля цилиндрического зеркального анализатора с одномерной сеткой по разрезам апертуры. Изучено влияние краевого поля вблизи сеток на траекториях заряженных частиц. Получены формулы для трансмиссии и угловой аберрации, даны некоторые оценки. Показано, что разрешение анализатора с одномерными сетками может быть еще лучше, чем без учета эффекта краевых полей.

В работе [99] получены аналитические выражения для основных параметров цилиндрического анализатора, по торцам которого установлены плоские электроды с потенциалом внутреннего цилиндра. Рассчитаны одно- и двухпериодные режимы его работы с фокусировкой первого порядка по углу для объекта, вынесенного за пределы анализатора. Получено, что чем больше расстояние от объекта до переднего торца анализатора, тем меньше его светосила. Рассчитана интенсивность пучка на выходе при сканировании

поверхности образца тонким первичным пучком, а также при наличии объекта конечных размеров. Найдены эмпирические формулы для спада интенсивности по мере удаления от центра объекта. Сравнение расчетов, выполненных численно по программе для двумерной оптики заряженных частиц и по аналитическим формулам, показало, что их различие составляет не более 10%.

В работе [100] проведен расчет условий фокусировки и угла наклона линии фокусов для пучка заряженных частиц с энергоугловой корреляцией при прохождении им систем с поперечной дисперсией. Приведены формулы для положения изображения в ряде электростатических и магнитных энергоанализаторов. Подробно рассчитаны параметры для цилиндрического дефлектора. В работе [101] найдено условие фокусировки пучков с энергоугловой корреляцией при расположении источника и детектора на нижней пластине плоского конденсатора. Приведены выражения для сферической аберрации второго порядка и дисперсии.

В работе [102] предложен необычный, но очень эффективный подход к решению некоторых актуальных электронно-оптических проблем. В частности, предлагаемый класс электростатических устройств подходит для коррекции геометрических аберраций в двухкаскадных системах электронных спектрометров и временных аберраций в новых системах масс-спектрометров с высоким коэффициентом пропускания для транспортировки потоков с большим фазовым объемом на заданное расстояние. Такие устройства технически легко реализуемы методами современных технологий.

Статья [103] посвящена основным аспектам эволюции нового класса электростатических энергоанализаторов электронных и ионных потоков, названных авторами "квазиконическими". Рассматривается генезис основных физических и математических идей, строится точная математическая теория расчета таких систем, описываются реальные конструкции, приводятся результаты экспериментов и обсуждаются перспективы развития данного направления.

В работе [104] разработаны матрицы передачи аберраций второго порядка для электронно-оптических систем монохроматора и энергоанализатора. Оба эти прибора имеют две магнитные круглые линзы и тормозящий фильтр. Фильтр состоит из замедляющей линзы, фильтра Вина и ускоряющей линзы. Оптимальное возбуждение круглых линз обеспечивает параллельный выход электронов с ускоряющей линзы. Возбуждение в фильтре Вина регулирует фокусировку пучка на щели. Результаты расчетов полезны для нахождения оптимальных условий эксплуатации и для объяснения экспериментальных результатов электронного спектрометра потерь энергии с высоким разрешением.

Новый геометрический критерий для оптимизации спектрометра потерь энергии электронов с высоким разрешением, основанный на сферическом 180° -ном и цилиндрическом 127° -ном дефлекторах предложен в работе [105]. Данный критерий связан с относительной геометрической конфигурацией электродов, и его применение улучшает энергетическое разрешение спектрометра тандемного монохроматора-анализатора, используемого в

спектроскопии потерь энергии электронов с высоким разрешением для исследования поверхностей. Расчеты траекторий электронов для сферических и цилиндрических полей показали, что существует конфигурация тандема, в которой электроны хорошо перефокусируются по положению и энергии на выходе из анализатора. Обычная конфигурация тандема дает плохо определенное изображение из-за оптических aberrаций дефлекторов. Коррекция этих aberrаций возможно, если применить модификацию обычной конфигурации. Новая геометрия может быть достигнута путем простого вращения обоих анализаторов и монохроматора на 90^0 по отношению к оси пучка, либо 180^0 -го вращения монохроматора от обычной конфигурации. Также показано, что принятие этих геометрических конфигураций согласуются с принципом дисперсионной компенсации, если выходное отверстие монохроматора и входное отверстие анализатора соответственно увеличены.

В статье [106] исследованы свойства времяпролетной фокусировки пучков заряженных частиц в двумерном электростатическом поле со средней плоскостью. Получены простые аналитические соотношения, связывающие между собой коэффициенты разложений времени пролета частицы и ее координаты в ряды по малым параметрам. Найдены условия устранения различных видов времяпролетных aberrаций.

В работе [107] рассмотрена задача численного анализа электростатического поля отдельных элементов сложных трехмерных электронно-оптических систем.

Метод исследования пространственных и времяпролетных свойств полярно-тороидальных анализаторов заряженных частиц на основе расчета aberrационных интегралов предложен в работе [108]. Эффективность метода проиллюстрирована сравнением результатов проведенных на его основе расчетов с результатами численного моделирования и экспериментальных измерений.

В работе [109] рассчитаны амплитуды пространственных гармоник поля при заданных смещениях электродов квадрупольного фильтра масс относительно оптимального положения. Рассмотрены случаи радиального и углового смещений электродов, асимметрии питания электродов, а также неидентичность диаметров стержней. Полученные данные необходимы для расчета реальной формы массового пика и будут полезны при конструировании фильтра масс.

В статье [110] приведен расчет положения изображения в зависимости от положения объекта (полого пучка) для электростатической системы в виде двух коаксиальных цилиндров и торцевой диафрагмы с кольцевой щелью.

В работе [111] предложен статический анализатор заряженных частиц по массе с неоднородным магнитным полем. В аналитическом виде получено выражение для распределения магнитного потенциала, на основании которого найдены формулы основных параметров в плоскости дисперсии при наличии угловой фокусировки первого порядка. Получены также условия пространственной фокусировки при расположении источника и приемника вне пределов магнитного поля. Найдены режимы работы, при которых траектория

имеет три поворота, т.е. большую протяженность пути заряженных частиц. Это приводит к существенному увеличению дисперсии по массе.

В работе [112] в аналитическом виде получено распределение электростатического потенциала, а также основные параметры анализатора по энергии простой конструкции. Найдены режим его работы с максимальной возможной дисперсией в широком диапазоне угловых размеров полезадающего электрода.

В работе [113] использованы правила движения электрона в сферических координатах для рассмотрения нерегулярных, несферических границ в «областях Герцога» на выходных и входных плоскостях полусферических энергоанализаторов. Проведены сравнения и проверка на усовершенствования некоторых классических схем, т.е., внезапное сокращение «идеального полевого» приближения, реальные апертуры в 180° плоскости, коррекция Герцога, коррекция Иост, и сокращенные сферы. Исследованы фокусировка, максимальная ширина траектории, основное разрешение, и бананообразная асимметрия для кругового рекомендованного пути. Представлены уравнения конструкции.

В работе [114] определено распределение времени прохождения электронов, проходящих полусферический энергоанализатор с высоким разрешением. Сравнение наших результатов измерений с аналитическими выражениями, показывает, что различное время прохождения между электронами с одинаковыми кинетическими энергиями растет на орбите Кеплера, на которой электроны движутся вокруг полушарий. Для облегчения измерений, установлен позиционно-чувствительный электронный детектор, способный срабатывать на одиночное событие внутри спектрометра. Этот прибор основан на линиях задержки анода.

На основе анализа движения заряженных частиц в дисперсионных анализаторах в работе [115] получены и решены уравнения, связывающие сигнал на выходе анализатора и функцию распределения по энергии, попадающих в него заряженных частиц. Рассмотрено влияние поправок на восстановление энергетического распределения по сравнению со стандартной процедурой.

Получено уравнение, связывающее сигнал на выходе электростатического дисперсионного анализатора и функцию распределения по энергии попадающих в него заряженных частиц при учете флуктуаций потенциалов на отклоняющих электродах в работе [116]. Получены решения этого уравнения. Рассмотрено влияние шума на аппаратные функции анализаторов.

Работа [117] посвящена исследованию влияния входных параметров электронных пучков на форму аппаратной функции цилиндрического энергоанализатора. Показано, что выбором углов входа электронного пучка в энергоанализатор можно значительно уменьшить "хвосты" пиков.

В работе [118] приведен алгоритм решения проблемы оси в решении аксиального уравнения Лапласа применительно к методу граничных интегральных уравнений, в котором интегральное уравнение с помощью

метода коллокации и метода аналитической замены и последующего аналитического интегрирования трансформируется в матричное уравнение. Разработан алгоритм вычисления потенциала и его производных на оси до четвертого порядка.

В статье [119] представлен алгоритм вычисления аппаратной функции аксиальных электростатических энергоанализаторов, основанный на численном решении уравнений движения и обработке результатов этих вычислений.

На основе теории возмущений в работе [120] рассмотрены решения ряда важных проблем вычислительной оптики заряженных частиц. Среди них вычисление возмущений электрических и магнитных полей, вызванных малыми отклонениями формы электродов или магнитных полюсов от вращательной или планарной симметрии, включая краевые эффекты. В общем тензорном виде рассмотрен абберационный анализ пучков заряженных частиц. Показано, что методы теории возмущений в сочетании с другими численными подходами, такими как метод тау-вариаций и обобщенный метод варьирования начальных параметров, оказываются эффективными в задачах расчета механических допусков, а также моделирования кулоновского расталкивания и рассеяния частиц на сетках.

В работе [121] численно исследованы условия фокусировки второго порядка в конических системах. Рассмотрена угловая фокусировка второго порядка для систем с совпадающими вершинами, как функция относительной энергии электрона. Представлены соответствующие зависимости при различных значениях половины угла внутреннего конуса. Представлена угловая фокусировка второго порядка как зависимость положения точечного источника на оси симметрии от половины угла конуса для систем с параллельными образующими. Обсуждена возможность достижения фокусировки второго порядка в конечно-размерных конусных системах. Даны электронно-оптические схемы для данных приборов.

В работе [122] предложен численный метод оценки одного из важнейших параметров электронно-оптических систем - порядка угловой фокусировки. Метод основан на определении величины взаимной корреляции степенной функции и сформированной в ходе траекторного анализа функции угла влета заряженных частиц. Проведена проверка метода на системах, допускающих аналитические решения.

В статьях [123,124] приведена методика численного моделирования электронно- и ионно-оптических систем; предложены алгоритмы и методы обеспечения высокой точности вычисления функции распределения потенциала методом граничных элементов; разработан метод поиска условий угловой и пространственной фокусировок высоких порядков. На базе данных методов создано программное обеспечение для траекторного анализа систем корпускулярной оптики, проведены исследование погрешностей вычислений и детальное тестирование на модельных схемах.

В работе [125] развит математический аппарат решения плоской внешней задачи Дирихле и получены формулы для вычисления граничных интегралов, в том числе с сингулярными ядрами. На базе предложенного аппарата создано

программное обеспечение для моделирования электронно-оптических систем, проведены исследование погрешностей вычислений и тестирование на модельных схемах.

Численный метод оценки одного из важнейших параметров электронно-оптических систем - порядка пространственной фокусировки, предложен в статье [126]. Метод основывается на определении величины взаимной корреляции степенной функции и сформированной в ходе траекторного анализа некоторой функции начальной координаты заряженной частицы. Проведена проверка метода на системах, допускающих аналитические решения.

Способ устранения дефокусировки пучков заряженных частиц в плоскости дисперсии в краевых полях секторного дефлектора был предложен в работе [127]. Метод основан на создании с помощью модификации геометрии краевой области дефлектора, немонотонного распределения напряженности отклоняющего электростатического поля на оптической оси.

Статья [128] посвящена дальнейшему прогрессу в области теоретического синтеза и практического воплощения электростатических энергоанализаторов с рекордными параметрами по светосиле и разрешению. В основу поиска оптимальных решений положена компьютерная стратегия, использующая самые современные пакеты программ, в частности SIMION. В данном случае речь идет о глубокой плавной деформации квазиконических систем с целью улучшения технологичности конструкции и повышения энергоанализирующих характеристик.

В работе [129] получены точные дифференциальные уравнения, определяющие отклонения траекторий заряженных частиц от осевой траектории, в криволинейных координатах, связанных с осевой траекторией пучка, в виде, удобном для проведения численных расчетов динамики пучков заряженных частиц, в том числе с учетом релятивизма. Эти уравнения записаны также в линейном приближении.

В статье [130] представлены результаты численного моделирования для оптимизации рассеянного поля полусферического дефлекторного анализатора, использованы численные методы - метод граничных элементов и метод конечных-разностей.

Особенности применения метода конечных элементов для расчета траекторий частиц в сильноточных электронных пучках с учетом их пространственного заряда рассмотрены в статье [131]. Показаны возникающие на нерегулярной сетке конечных элементов не физические эффекты, связанные с вычислением напряженности электрического поля с использованием функции формы, и предложены пути их устранения.

В работе [132] изучены электронно-оптические характеристики двумерных электрических полей с комплексным потенциалом вида $\Omega = i(x+iy)^n$, где n -вещественное число. Исследование динамики частиц производится в плоскости симметрии и ее окрестности с целью построения эффективного спектрографа электронных потоков. Показано, что в диапазоне показателей $0 < n < 1$ в системе осуществляется пространственная фокусировка по углам влета конических пучков, имеющая Π порядок в плоскости симметрии и, как

минимум, I порядок поперек нее. Линия изображений точечного источника (линия фокусов) имеет вид прямой, лежащей в плоскости симметрии, причем порядок фокусировки не зависит от энергии частиц. Таким образом, реализуется спектрографический принцип и появляется возможность одновременной фиксации парциальных потоков электронов на позиционно-чувствительном детекторе в широком диапазоне изменения энергий. Электродная конфигурация этих систем довольно простая и может быть использована для практической реализации спектрографа. Анализируются перспективы применения данных спектрографов в энергоанализе потоков заряженных частиц.

В работе [133] рассмотрен метод получения электростатических полей заданной формы в неявноэлектродной цилиндрической системе. «Распределенность» электродов (нитевидные проводники) дает возможность решить обратную граничную задачу – задавать такое азимутальное распределение электрического потенциала по периметру цилиндра, чтобы получить нужное поле внутри, обеспечив при этом большую рабочую область по сравнению с явноэлектродной системой.

2. ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА ЭЛЕКТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ESA-12 ТИПА «ДВУХКАСКАДНОЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ЗЕРКАЛО» В РЕЖИМ СПЕКТРОГРАФА

В исследованиях поверхности твердого тела большая роль отведена методам электронной спектроскопии. Основным узлом электронного спектрометра является энергоанализатор, как правило, зеркального или дефлекторного типа. Очень часто получение полной информации о физико-химических свойствах вещества затрудняется недостаточной экспрессностью регистрации спектров частиц, эмиттированных с поверхности исследуемого вещества. Данная проблема остро проявляется в фотоэлектронной спектроскопии с энергоугловым разрешением. Применение дисперсионных анализаторов энергий, работающих в режиме спектрографа, и позволяющих одновременно регистрировать распределения пучков заряженных частиц, дает возможность повысить экспрессность энергоанализа потоков заряженных частиц.

В Институте Ядерной Физики Академии Наук Чешской Республики (г.Ржеж под Прагой) длительное время эксплуатировался электронный спектрометр ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» с фокусировкой второго порядка. Спектрометр был разработан для использования в двух различных областях: исследование низкоэнергетической внутренней конверсии и оже-электронов от радиоактивного распада; исследование фото- и оже-электронов, возбужденных рентгеновскими лучами.

В работах [134,135] рассмотрена конструкция и дано подробное описание данного спектрометра, а также приведены примеры проведенных на нем измерений.

Ранее при применении одноканального детектора в спектрометре ESA-12 измерение значений интенсивностей спектров проводилось в реальном времени. Недостатком этих измерений является то, что полный спектр может быть получен только путем его последовательного сканирования. Такой способ регистрации спектра требует слишком длительного времени, и становится грубым при исследовании процессов, развивающихся во времени.

Перед нами встал вопрос о модернизации данного прибора, с целью расширения функциональных возможностей спектрометра, тем более конструкция дает возможность провести нужные модификации. В связи с этим, возникла необходимость расчета аппаратной функции спектрометра, которая ранее никогда не рассчитывалась, с целью оптимизации диафрагм и пропускных окон в электронно-оптической схеме двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора.

Основной целью данного раздела является изучение возможности перевода электронного спектрометра ESA-12 в многоканальный режим счета частиц. Применение многоканального детектора позволит в десятки раз сократить время эксперимента. Перевод спектрометра ESA-12 в режим спектрографа обеспечит простоту в эксплуатации и обслуживании прибора.

2.1 Электростатический электронный спектрометр ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало»

Описание прибора. Электростатический электронный спектрометр ESA-12 был разработан для исследования низкоэнергетических электронных спектров. Основной идеей конструкции является разработка многофункционального спектрометра, удовлетворяющего различные потребности при проведении исследований в области ядерной и атомной физики. Согласно этой идеи:

а) Разрешение (трансмиссия) спектрометра может изменяться на один порядок.

б) электронные спектры могут быть измерены в режиме предварительного замедления частиц, так и без нее.

в) Устройство управления системы, связанное с компьютером позволяет проводить автоматическую запись спектров.

г) Вакуумная система и камера с механизмом перемещения позволяет проводить замену исследуемого образца, при которой вакуум в камере спектрометра нарушается незначительно и быстро возобновляется.

В электронно-оптической схеме спектрометра выполняется фокусировка второго порядка по углу между осью спектрометра и направлением частиц, эмиттируемых с образца. Электронно-оптическая схема спектрометра позволяет использовать протяженные источники, электронно-оптические изображения которых, соответствует размерам детектора и в тоже время обеспечивает угловую фокусировку второго порядка.

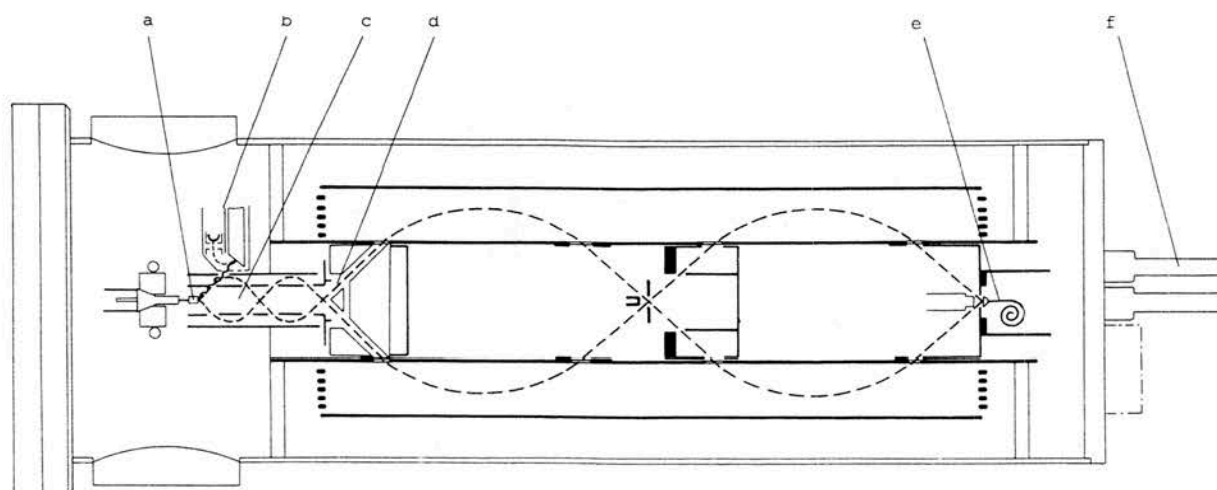
Электроны, эмиттированные с источника, движутся по линейной траектории – в случае измерения без замедления – до входа в щель внутреннего цилиндра спектрометра, через которую они входят в электростатическое поле, созданное между внутренним и внешним цилиндрами. Под действием отражающего поля (внешний цилиндр под отрицательным потенциалом, внутренний цилиндр заземлен), частицы возвращаются, проходят сквозь выходную щель спектрометра и попадают в область внутреннего цилиндра и достигают детектора. Схема продольного сечения электронного спектрометра, показана на рисунке 9.

Двухкаскадный прибор (рисунок 9) имеет два преимущества: во-первых, это значительное сокращение количества рассеянных электронов, т.е. при этой конфигурации только трехкратно рассеянные электроны достигают детектор, и тем самым существенно подавляется фон спектрометра; во-вторых, прибор обладает оптимальными диаметрами относительно к длине коаксиальных цилиндров.

На рисунке 10 представлены внешний вид электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» (а) и радиоактивного протяженного источника в форме диска диаметром 8 мм (б).

Кольцевая входная щель, выступающая в качестве виртуального электронно-оптического элемента, вместе с большими размерами анализатора позволяет использовать источники с большой площадью. Это является важным

для низкоэнергетической электронной спектроскопии радиоактивных образцов. Форма источника может быть либо в виде диска диаметром 6-8 мм, либо цилиндра длиной и диаметром 6-8 мм. Электроны, испускаемые вне аксиальной плоскости, фильтруются щелью во внутреннем цилиндре. Замедляющая линза состоит из конических электродов, которая размещается между источником и входной щелью.



а - образец, б - рентгеновская трубка, в - транспортировка электронов, г - замедляющая линза, д - детектор, е - микрометрический винт

Рисунок 9 - Схема продольного сечения спектрометра ESA-12

Примечание – использовано из источника [134]

Энергетический диапазон электронного спектрометра лежит в области от 100 эВ до 20 кэВ. Разрешение можно плавно регулировать (настройкой ширины щелей) в пределах от 0,2 % до 2% без нарушения вакуума. Лучшее разрешение, полученное с помощью замедляющей линзы от 0,04% при 1,4 кэВ при 93% замедления.



а)



б)

Рисунок 10 - Внешний вид электронного спектрометра ESA-12 (а) и радиоактивного источника в позолоченном держателе – активная поверхность на Pt подложке имеет форму диска диаметром 8 мм (б).

В спектрометре можно регулировать ширины входной и выходной щелей, а также фокальную длину спектрометра. Эти параметры регулируются без нарушения вакуума, при этом используется механизм линейного перемещения, установленного на торце спектрометра. Разрешение спектрометра увеличивается приблизительно линейно с увеличением ширины щелей и составляет 0,1-1 процентов (в зависимости от ширины) от величины энергии, которую имеют электроны при их проходе между цилиндрами.

Для фокусировки электронов с энергией E_0 из образца на детектор, в основном режиме работы спектрометра, необходимо приложить на внешний цилиндр напряжение U_0 , которое дается выражением

$$U_0 = cE_0 \quad (1)$$

где $c = 0,562 \text{ В/эВ}$ - константа спектрометра [135, с.280]. В основном режиме электронный спектр получается в циклах. Напряжение на внешнем цилиндре постепенно растет с заданным шагом и в заданном интервале. После каждого шага идет в заданное время счет электронов на детекторе. Когда закончен счет для шага у верхней границы интервала, напряжение возвращается к нижней границе, и процесс измерения повторяется, пока не совершится заданное число циклов. Напряжение U_0 (оно обычно больше 1000 В) измеряется с помощью вольтметра и делителя. Разрешение спектрометра изменяется, поскольку оно зависит от U_0 .

Энергия электронов, попадающих в поле между цилиндрами, может быть уменьшена с помощью замедляющей линзы – режим работы спектрометра с замедлением. При этом имеет место соотношение:

$$U_0 = c(E_0 - U_r, q) \quad (2)$$

где U_r - напряжение замедления и $q = |e|$, где e представляет заряд электрона.

В режиме замедления измерение тоже проходит в циклах. В этом случае напряжение U_0 на внешнем цилиндре придерживается постоянным и измеряется одним вольтметром прямо (величина этого напряжения до 1000 В и поэтому ее можно вольтметром определить с достаточной точностью). Замедляющее напряжение U_r (оно обычно больше 1000 В) меняется подобно тому, как это происходило в случае основного режима и измеряется с помощью делителя и второго вольтметра. Естественно, здесь разрешение не меняется в ходе цикла, и оно может быть настроено при подходящем выборе U_0 . Этот режим приводит к потере электронов на замедляющей линзе, величина которой растет со значением U_r .

На траекторию низкоэнергетических электронов в энергетическом диапазоне спектрометра значительно влияет магнитное поле Земли. Для устранения влияния магнитного поля энергоанализирующая часть в спектрометре покрыта двухслойным металлическим магнитным экраном.

2.2 Расчет аппаратной функции электронного спектрометра ESA-12

Аппаратная функция для электронного спектрометра ESA-12 никогда не рассчитывалась. Необходимо было рассчитать по геометрии анализатора аппаратную функцию для энергии 7300еВ. Линия этой энергии в связи с проектом KATRIN (the KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) измерялась неоднократно. При этом было отмечено, что линия шире примерно на 2 эВ по сравнению с ожидаемой.

Аппаратная функция является одной из основных характеристик как аксиальных электростатических энергоанализаторов, так и многих других электронно- и ионно-оптических приборов. Аппаратная функция (кривая пропускания, приборная линия, инструментальная функция, функция отклика) аксиального электростатического энергоанализатора пропорциональна зависимости моноэнергетического электронного потока, проходящего через выходную щель энергоанализатора, от энергии электронов. Если известна аппаратная функция, то не составляет труда определить разрешающую способность и пропускание. В электронной оптике существует метод, имеющий название «траекторный», в результате применения которого можно получить основные характеристики изучаемого энергоанализатора [136, 137].

На первом этапе работы проведено моделирование электронно-оптической схемы энергоанализатора типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» [138,139] с помощью численной программы «Фокус» моделирования осесимметричных корпускулярно-оптических систем. Программа «Фокус» состоит из нескольких модулей, обмен информацией между которыми осуществляется с помощью файлов данных [140,141]. Программа позволяет осуществить ввод и модификацию электронно-оптической схемы, получить распределение потенциала поля и провести расчет траекторий заряженных частиц.

На рисунке 11 представлено продольное сечение электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало». Рисунок 11 был получен на основе расчета с помощью программы «Фокус», размеры выражены в сантиметрах. В расчете были использованы параметры спектрометра - размеры цилиндров, радиусы щелей и диафрагм – по данным статьи [134, с.478]. Как видно из рисунка 11, частица при отношении ее энергии к напряжению на внешнем цилиндре $E/U=1,77$ эВ/В из точечного источника под центральным углом 40.85° пролетает сквозь середины всех щелей.

На рисунке 12 изображено распределение электрического поля в схеме двухкаскадного цилиндрического энергоанализатора. Показана только верхняя часть продольного сечения схемы энергоанализатора. Здесь произведено вычисление значений потенциалов в узлах сетки разбиения области и закрашивание поля вывода цветом. В каждой точке цвет соответствует величине потенциала – чем больше потенциал, тем «теплее» цвет. На рисунке 13 приведено трехмерное изображение сечения электростатического поля рассматриваемой системы.

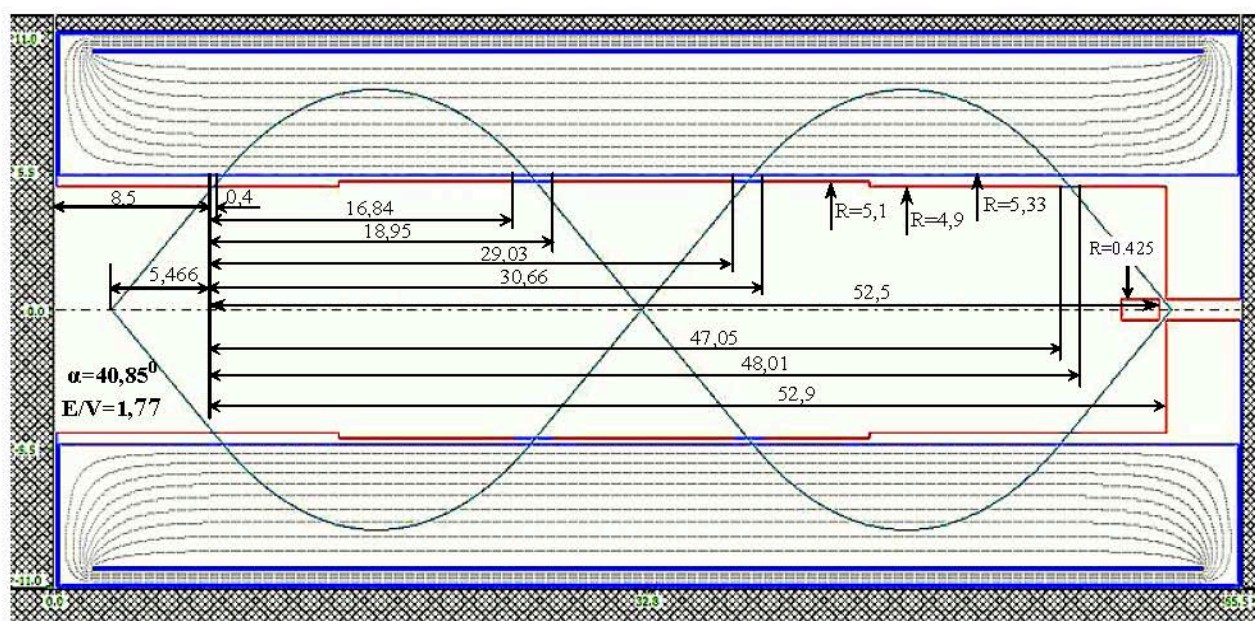


Рисунок 11 - Схематическое изображение продольного сечения спектрометра ESA-12 с траекторией движения электронов

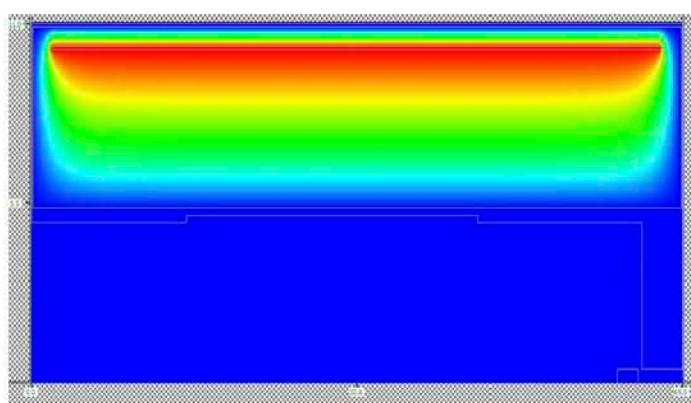


Рисунок 12 - Распределение поля в энергоанализаторе

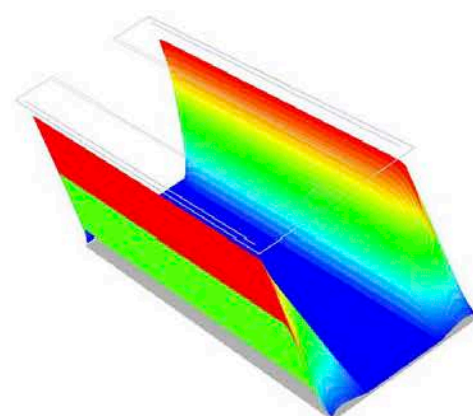


Рисунок 13 - Трехмерное изображение сечения поля

Рисунок 14 представляет ход траекторий заряженных частиц в данной электронно-оптической схеме двухкаскадного энергоанализатора в случае точечного источника. Точечный источник расположен на оси симметрии энергоанализатора. Диапазон начальных углов входа частиц в анализатор $40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$. Отношение кинетической энергии заряженной частицы потенциалу внешнего электрода - $E/V=1.77$ эВ/В. Положение источника в используемой для расчетов системе координат – $x = 3,034$ мм; $y = 0$, т.е. оптимальное положение источника относительно левого края входной апертуры $Z(\text{ист.}) = - 5,466$ мм. Потенциал внешнего цилиндрического электрода равен 1. При расчетах шаг изменения входного угла был равен $0,1^{\circ}$. Ширина входной щели 0,4 мм. Пучок заряженных частиц выходит из точечного источника, дважды отражается в электростатическом поле зеркала и достигает детектор. Из расчетов определено, что линейная дисперсия составляет $D=250$.

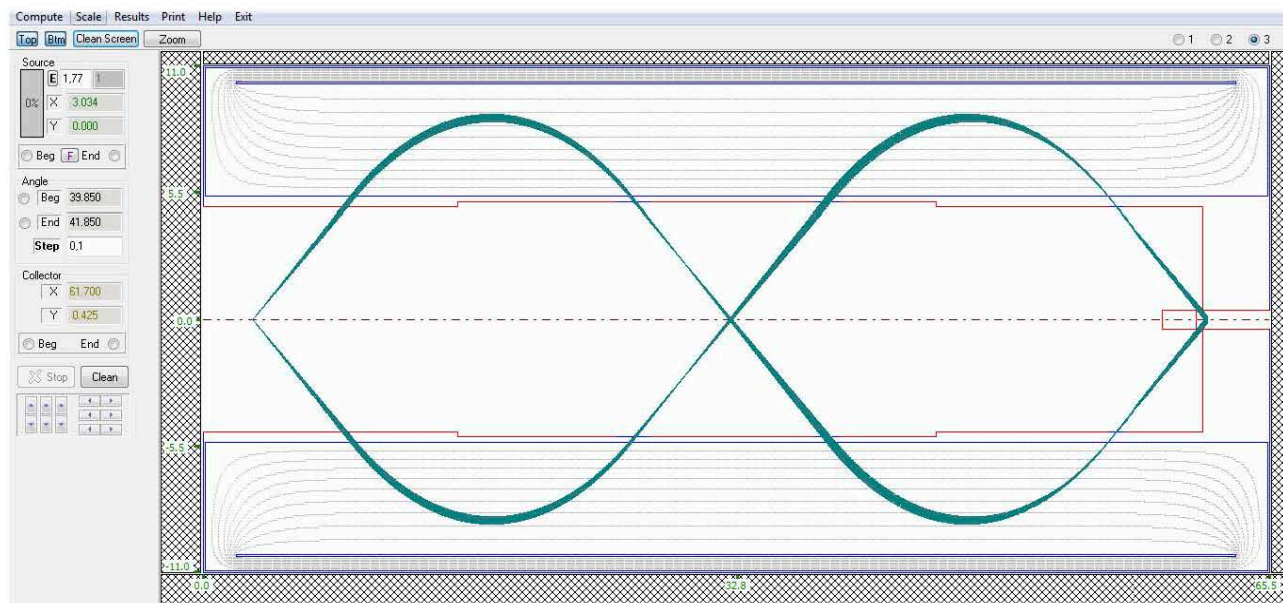


Рисунок 14 - Траектории движения заряженных частиц с кинетической энергией $E/V=1.77$ эВ/В, начальные углы $40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$, источник точечный

На рисунке 15 показано увеличенное изображение траекторий движения заряженных частиц при прохождении выходной диафрагмы. На рисунке 16 представлена конструкция в трехмерном виде, полученная с помощью программы AutoCAD.

Для расчета аппаратной функции электронно-оптической системы запускаются частицы из точечного источника в диапазоне начальных углов $40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$ и в диапазоне энергий (точнее E/V) 1.75-1.79 эВ/В. На рисунке 17 показаны траектории заряженных частиц в указанных диапазонах входных углов и энергий при расчете аппаратной функции в случае точечного источника. На рисунке 18 представлена аппаратная функция системы для случая точечного источника.

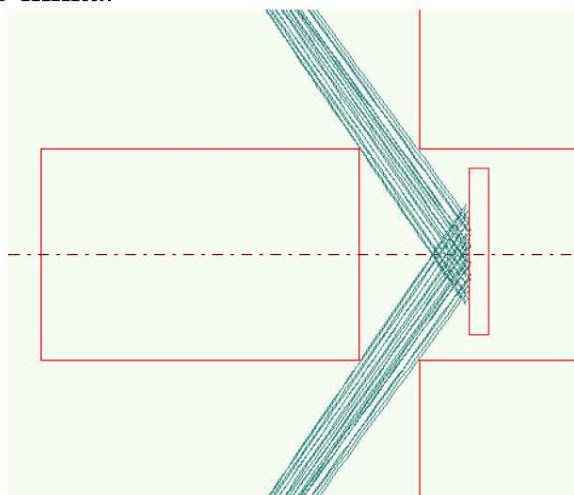


Рисунок 15 - Увеличенное изображение траекторий движения частиц при прохождении выходной диафрагмы

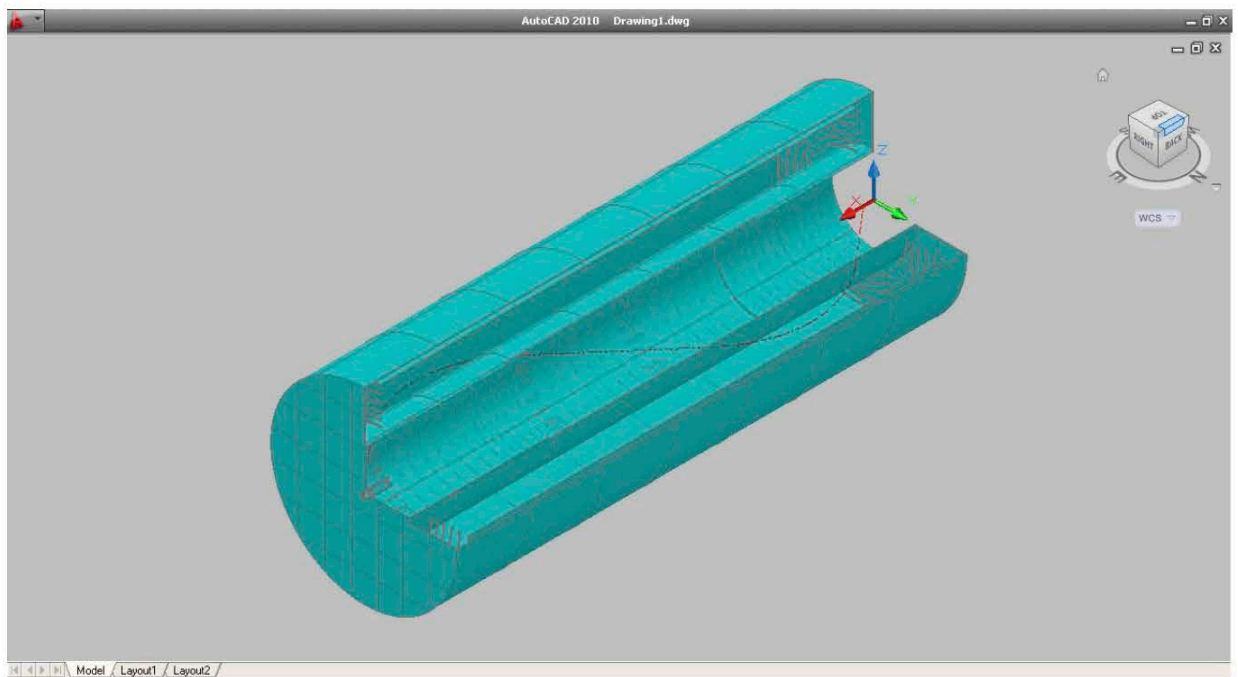


Рисунок 16 - 3D-вид конструкции двухкаскадного цилиндрического зеркального энергоанализатора

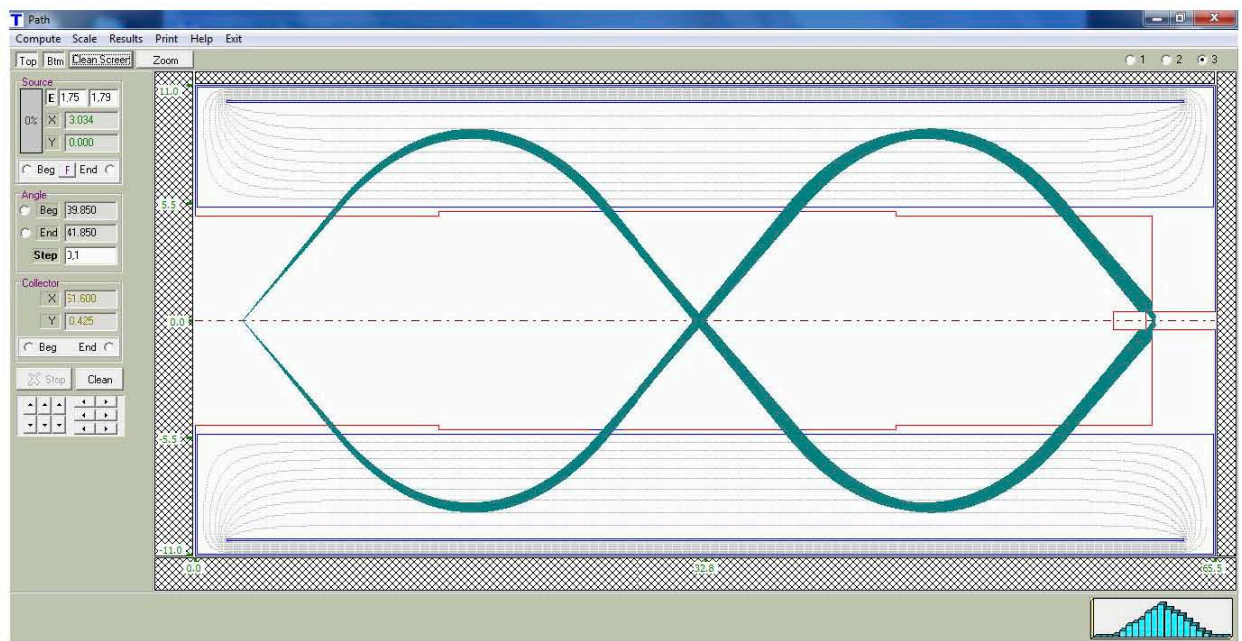


Рисунок 17 - Траектории заряженных частиц при расчете аппаратной функции, кинетические энергии 1.75-1.79 эВ/В, начальные углы $40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$, источник точечный

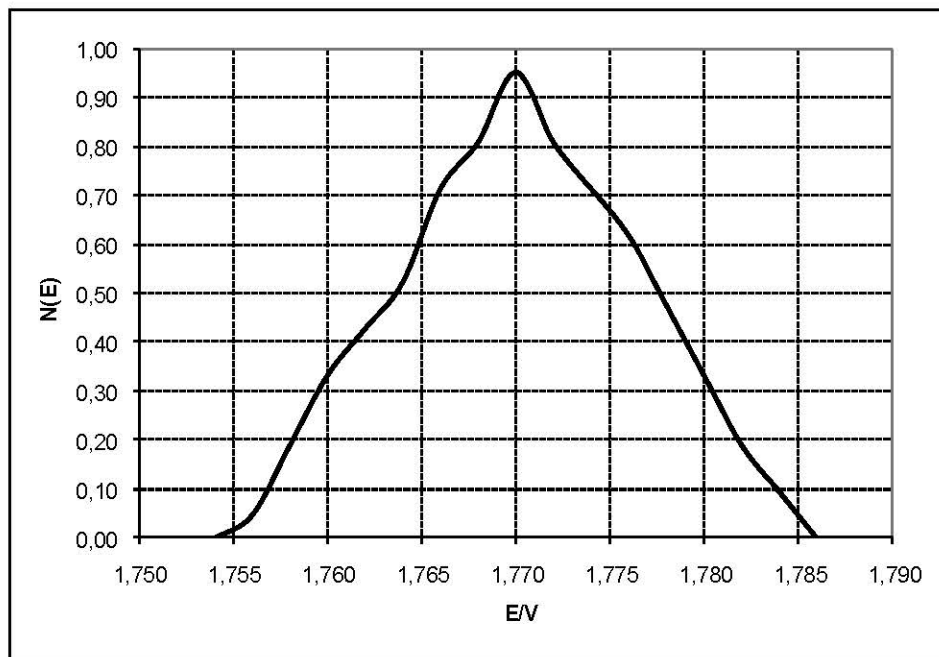


Рисунок 18 - Аппаратная функция двухкаскадного цилиндрического энергоанализатора для случая точечного источника

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора составляет 0,82% при светосиле $\Omega/2\pi=2,2\%$.

Также были рассчитаны аппаратные функции при различных ширинах входной щели: 6 мм и 8 мм. Расчеты показали, что изменение ширины входной щели не сильно влияют на энергетическое разрешение спектрометра.

В случае протяженного источника в виде диска заряженные частицы, эмиттированные с источника, пройдут входную щель и попадут в поле только в диапазоне начальных углов $40,85^\circ \pm 3,5^\circ$. Диапазон начальных углов можно легко определить из рисунка 19.

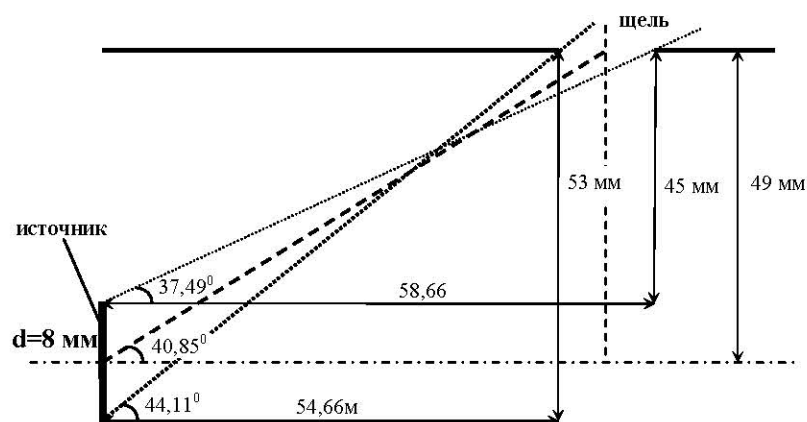


Рисунок 19 – Схема расчета начальных углов входа частиц в анализатор, эмиттированных с поверхности протяженного источника в виде диска диаметром $d=8$ мм

Для вычисления аппаратной функции в случае протяженного источника в виде диска диаметром $d=8$ мм, запускаются частицы в диапазоне начальных углов $40.85^0 \pm 3,5^0$ и в диапазоне энергий 1.755-1.785 эВ/В. На рисунке 20 приведены траектории заряженных частиц в указанных диапазонах начальных углов и энергий при расчете аппаратной функции в случае протяженного источника в виде диска диаметром $d=8$ мм.

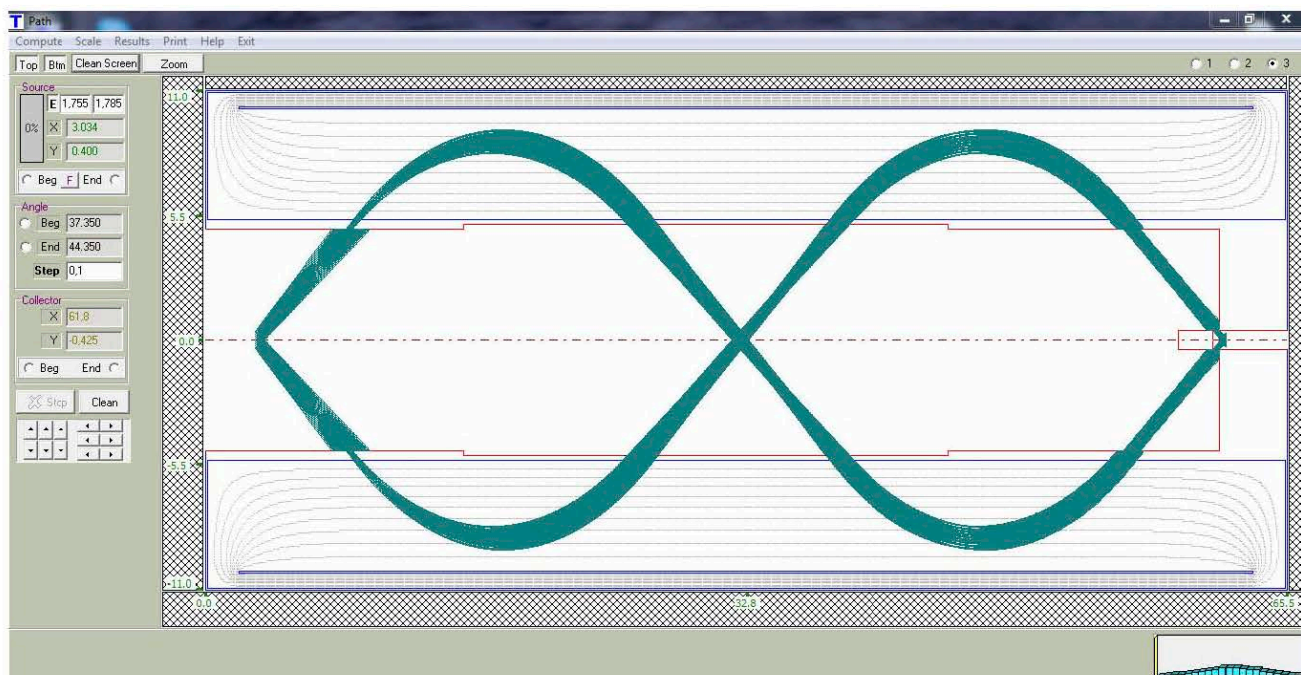


Рисунок 20 - Траектории заряженных частиц при расчете аппаратной функции, кинетические энергии 1.755-1.785 эВ/В, начальные углы $40.85^0 \pm 3,5^0$, источник в виде диска диаметром $d=8$ мм

На рисунке 21 представлена аппаратная функция двухкаскадного цилиндрического энергоанализатора для случая протяженного источника в виде диска диаметром $d=8$ мм.

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора в случае протяженного источника в виде диска диаметром $d=8$ мм составляет 0,84%.

Также рассчитаны аппаратные функции для случаев протяженных источников в виде дисков диаметрами 4 и 6 мм. Расчеты показали, что изменение размера диска не приводит к существенным видоизменениям аппаратной функции, т.е. незначительно влияет на энергетическое разрешение спектрометра.

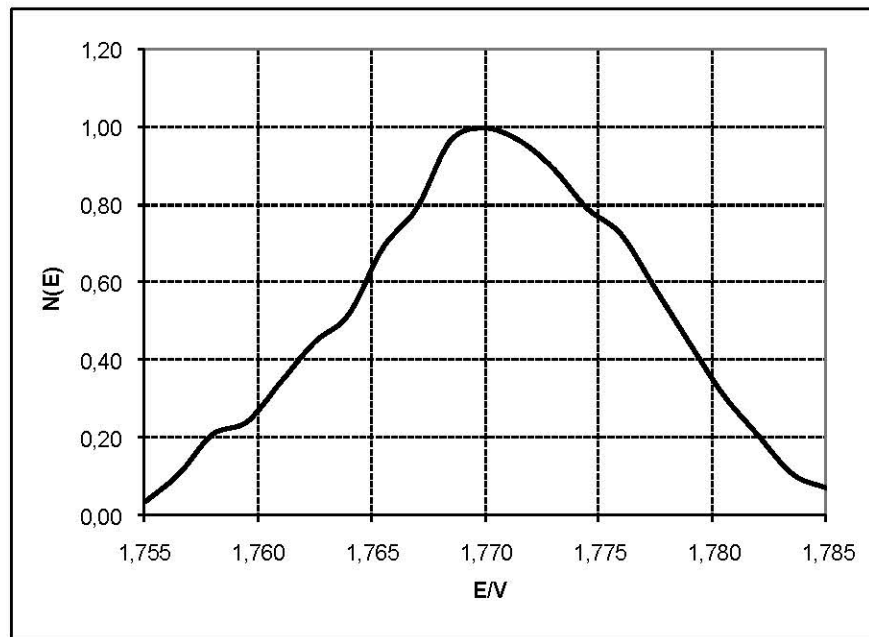


Рисунок 21 - Аппаратная функция двухкаскадного цилиндрического энергоанализатора в случае протяженного источника в виде диска диаметром $d=8\text{мм}$

Таким образом, исследована модель двухкаскадного цилиндрического зеркального анализатора посредством численных расчетов. Проведен траекторный анализ движения заряженных частиц в данной электронно-оптической схеме. Впервые построены аппаратные функции спектрометра ESA-12 в случаях точечного и протяженного источников, что позволило оценить энергетическое разрешение прибора.

2.3 Перевод электронного спектрометра ESA-12 в режим спектрографа

Перевод электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» в режим спектрографа связан с решением задачи о спрямлении линии фокусов и выявлении режима оптимального сближения ее с поверхностью детектора. Только на основе этих данных можно прогнозировать эффективность перевода энергоанализатора в режим спектрографа. Такой перевод предполагает использование подходящего позиционно-чувствительного детектора, например микроканальной пластины. Линия фокусов анализатора – геометрическое место фокусов пучков заряженных частиц различных энергий [142]. Известно, что в простом цилиндрическом зеркальном анализаторе, линия фокусов является сложной кривой, и осуществить режим спектрографа трудно. Многокаскадный цилиндрический зеркальный анализатор, однако, позволяет выпрямить эту линию и тем самым использовать устройство в качестве спектрографа. Этот принцип был установлен и численно доказан В.В.Запкварой и соавт. [59, с.88]. В качестве критерия спрямления линии фокусов принято равенство нулю угла наклона

касательной к линии фокусов, что приводит к условию $d\Delta/d\varepsilon = 0$, где Δ - расстояние от базовой поверхности до фокусов, $d\varepsilon$ - разброс по кинетической энергии в пучке. Это условие следует рассматривать совместно с условием угловой фокусировки пучка заряженных частиц. Задачу о спрямлении линии фокусов в двухкаскадном цилиндрическом зеркале можно решить путем введения третьего дополнительного внутреннего коаксиального цилиндрического электрода.

В работе [143] на базе комбинации двух областей с различными цилиндрическими симметричными электростатическими полями можно построить энергоанализатор с фокусировкой третьего порядка. Требуемая конфигурация поля достигается добавлением третьего цилиндрического электрода, размещаемого между внутренним и внешним коаксиальными цилиндрическими электродами. Фокусировка третьего порядка имеет место при значении входного угла $\alpha = 39.98^\circ$, при величине оптимального отношения радиусов внутренних цилиндров, равной 1.4754 и величине отношения напряженности поля на внутренней поверхности промежуточного цилиндра к напряженности на внешней поверхности того же цилиндра, равной 1.0889. Результирующее фокусное расстояние вдоль оси анализатора составляет $5.7764 \cdot r_1$, где r_1 - радиус внутреннего цилиндрического электрода. Для диапазона входных углов $\Delta\alpha = 9.34^\circ$ разрешение $\Delta E/E$ такого анализатора достигает значения 0.3%.

В статье [144] описаны характеристики трехэлектродного цилиндрического зеркального анализатора (ТЦЗА) для общего случая, когда электронно-оптический источник и изображение представляют собой кольца, коаксиальные с цилиндрами. Показано, что в ТЦЗА достигается фокусировка четвертого порядка, а в режиме фокусировки третьего порядка можно выбирать конструкции практически с любым углом входа главной траектории пучка. В режиме фокусировки второго порядка возможна конструкция с переменным фокусным расстоянием, задаваемым лишь потенциалами электродов.

С помощью аналитического метода, разработанного в работе [145], показана возможность достижения фокусировки четвертого порядка типа «ось-кольцо» в ТЦЗА общего вида. На базе теоретических расчетов был сделан вывод о более чем десятикратном улучшении энергетического разрешения по сравнению с обычным ЦЗ.

В работе [146] представлены результаты численных расчетов электронно-оптических характеристик модифицированного цилиндрического зеркального анализатора на основе трех коаксиальных цилиндрических электродов. Показано, что изображение точечного источника электронов располагается на оси симметрии анализатора в виде кольца, и не зависит от угла входа электронов в анализатор в диапазоне углов $\alpha = 30^\circ - 40^\circ$.

Согласно модифицированной схеме (рисунок 22), анализатор состоит из трех коаксиальных цилиндрических электродов: внешнего, среднего и внутреннего (радиусами r_1 , r_0 и r_2 соответственно), на внешний и внутренний электроды подаются отклоняющие потенциалы U и U_1 . Средний

цилиндрический электрод заземлен. Пучок заряженных частиц, выходящий под углом α из источника S, расположенного на оси симметрии энергоанализатора, два раза отражается от внешнего цилиндра 1 и один раз от внутреннего 3, при этом четыре раза пронизывает средний цилиндр 2. Далее фокусируется, формируя точечное изображение на оси симметрии Z. Таким образом, анализатор работает в режиме фокусировки типа «ось-ось».

На схеме траектория частиц основной энергии W_0 изображена сплошной линией, а штриховые линии – осевые траектории частиц с энергией отличной от W_0 на $\pm 10\%$ [147].

Выражение для длины проекции траектории движения заряженных частиц от источника до его изображения на ось симметрии определяется суммой проекций траекторий в каскадах цилиндрического зеркального анализатора [59, с.88]:

$$l = [\Delta + 4(nP_1\theta_1 + mP_2\theta_2)] \operatorname{ctg} \alpha \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} P_1 &= \sqrt{\frac{W}{qU}} \ln \frac{r_1}{r_0} \sin \alpha & \theta_1 &= e^{P_1^2} \int_0^{P_1} e^{-x^2} dx \\ P_2 &= \sqrt{\frac{W}{qU_1}} \ln \frac{r_0}{r_2} \sin \alpha & \theta_2 &= e^{-P_2^2} \int_0^{P_2} e^{x^2} dx \end{aligned} \quad (4)$$

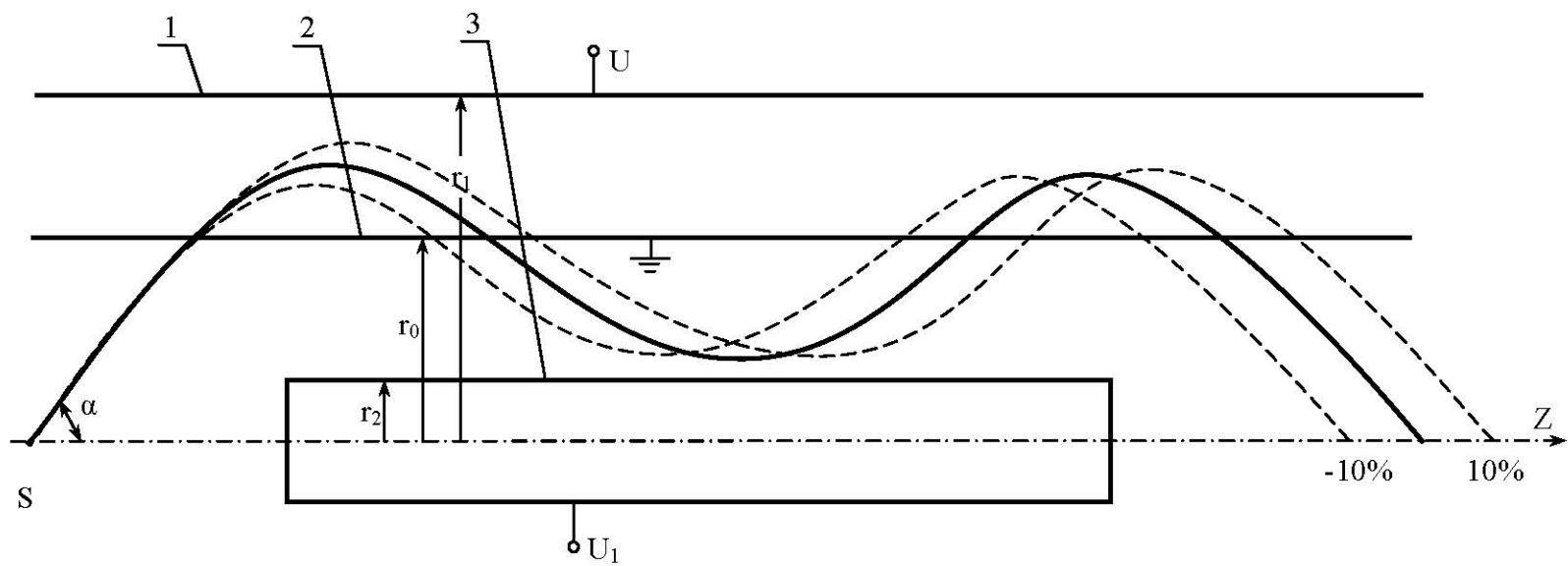
- параметры отражения, характеризующие цилиндрический зеркальный анализатор, q и W – заряд и кинетическая энергия частиц, $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ – суммарная удаленность источника и изображения от поверхности среднего электрода, n и m – число каскадов внутреннего и внешнего отражений соответственно.

При применении к спектрометру ESA-12 радиусы рабочих поверхностей среднего и внешнего электродов остаются неизменными и составляют: $r_0 = 53.3 \text{ мм}$, $r_1 = 102 \text{ мм}$, т.к. мы предполагаем минимальную модификацию прибора.

Величина радиуса поверхности внутреннего цилиндрического электрода r_2 была выбрана, исходя из требования равенства отклоняющих потенциалов U и U_1 в каскадах, которое приводит к соотношению

$$\frac{\ln r'_0/r_2}{\ln r_1/r_0} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 \quad (5)$$

где $r'_0 = 51 \text{ мм}$ – радиус внутренней цилиндрической поверхности среднего электрода. В этом случае, согласно соотношению (5), радиус дополнительного внутреннего цилиндрического электрода равен $r_2 = 16,33 \text{ мм}$.



1 – внешний цилиндр, 2 – средний цилиндр, 3 – внутренний цилиндр

Рисунок 22 - Модифицированная схема двухкаскадного цилиндрического энергоанализатора, обеспечивающая режим фокусировки типа «ось-ось»

Далее в работе проведено моделирование электронно-оптической схемы модифицированного энергоанализатора, на основе трех коаксиальных цилиндрических электродов посредством численной программы «Фокус».

Рисунок 23 представляет ход траекторий заряженных частиц с различными кинетическими энергиями 1 – $E/V=1,458$, 2 – $E/V=1,62$, 3 – $E/V=1,782$ в модифицированной электронно-оптической схеме энергоанализатора в случае точечного источника.

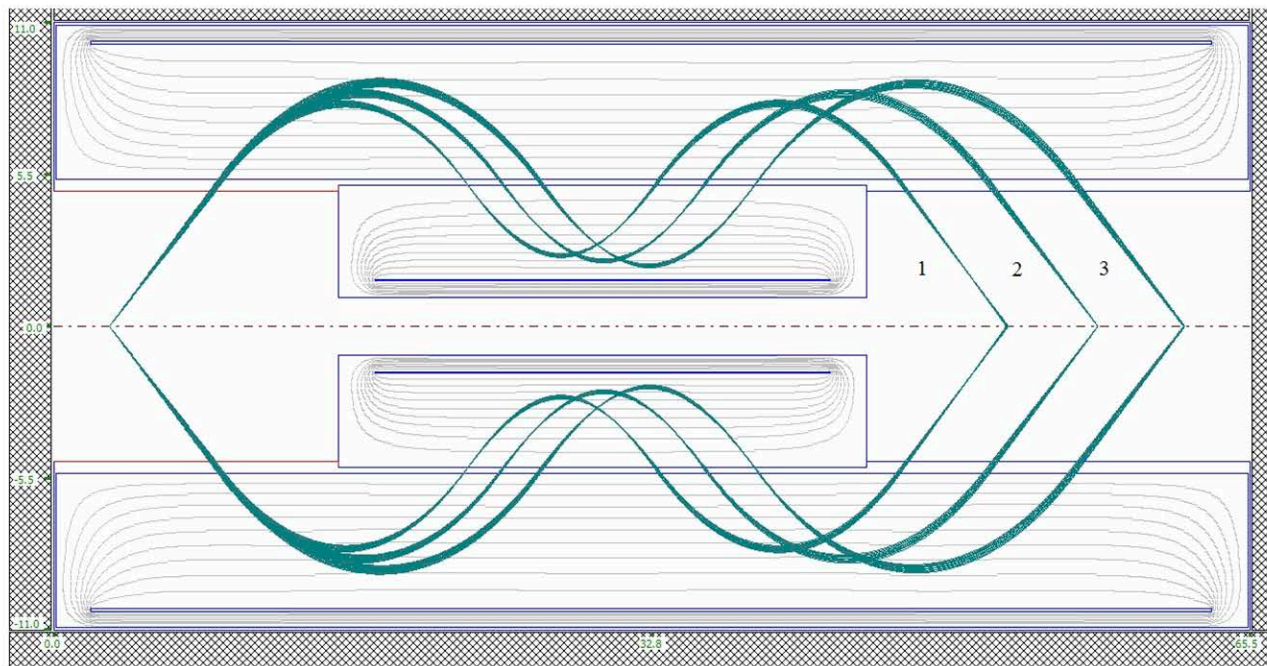


Рисунок 23 - Схематическое изображение траекторий заряженных частиц с различными кинетическими энергиями 1 – $E/V=1,458$, 2 – $E/V=1,62$, 3 – $E/V=1,782$, точечный источник, начальные углы $40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$

Точечный источник расположен на оси симметрии энергоанализатора. Диапазон начальных углов ($40.85^{\circ} \pm 1^{\circ}$), положение источника ($x=3,034$ мм; $y=0$), а также ширина входной цели остались неизменными. Как видно из рисунка 23, заряженные частицы летят из точечного источника до пересечения со средним цилиндрическим электродом в бесполовом пространстве. Далее частицы попадают в поле внешнего цилиндра, отклоняются обратно, входят в область поля внутреннего цилиндра, отталкиваются, проходят еще один каскад в поле внешнего цилиндра и выйдя снова в бесполовое пространство, фокусируются в точечное изображение [148].

Осевой пролет частиц, т.е. длина проекции траектории от источника до его изображения составляет $L=9,86r_0$, примерно близка к первоначальному значению в случае двухкаскадного зеркала $L=10,04 r_0$, что означает сохранение длин цилиндров, и таким образом обеспечивает минимальную модификацию спектрометра.

В таблице 1 в зависимости от энергетического интервала ε представлены данные о продольном размытии изображения на линии фокусов,

вызванном aberrацией из-за угловой расходимости пучка $\Delta\alpha = \pm 1\%$. Размытие задаются величиной $\Delta l = l(\varepsilon, \Delta\alpha) - l(\varepsilon, 0)$, рассчитанной для крайних траекторий пучка.

Таблица 1. Величины aberrационного размытия изображения на линии фокусов при угловой расходимости $\pm 1^\circ$

$\Delta\alpha$, градус	Δl , см
$\varepsilon = 10\%$	
1	0.015882
0	0,0
-1	0.059849
$\varepsilon = 5\%$	
1	0.005043
0	0
-1	0.045632
$\varepsilon = 0\%$	
1	0.020125
0	0.0
-1	0.017901
$\varepsilon = - 5 \%$	
1	0.027912
0	0.0
-1	0.007437
$\varepsilon = - 10 \%$	
1	0.076733
0	0.0
-1	0.083656

Из данных таблицы 1 видно, что в диапазоне $\varepsilon = 10\%$ имеет место хорошее качество фокусировки пучка.

На рисунке 24 представлены траектории заряженных частиц с различными кинетическими энергиями в случае протяженного источника в виде диска диаметром $d=8\text{мм}$: 1 – $E/V=1,458$, 2 – $E/V=1,62$, 3 – $E/V=1,782$.

При размере источника (области эмиссии) в 8 мм и длине микроканальной пластины 110 мм число одновременно разрешаемых энергетических линий на микроканальной пластине составляет 7. При энергетическом диапазоне 20% энергетическое разрешение в пределах микроканальной пластины изменяется незначительно и составляет $R \approx 2,5\%$. Улучшения разрешающей способности схемы можно добиться путем уменьшения размера области эмиссии.

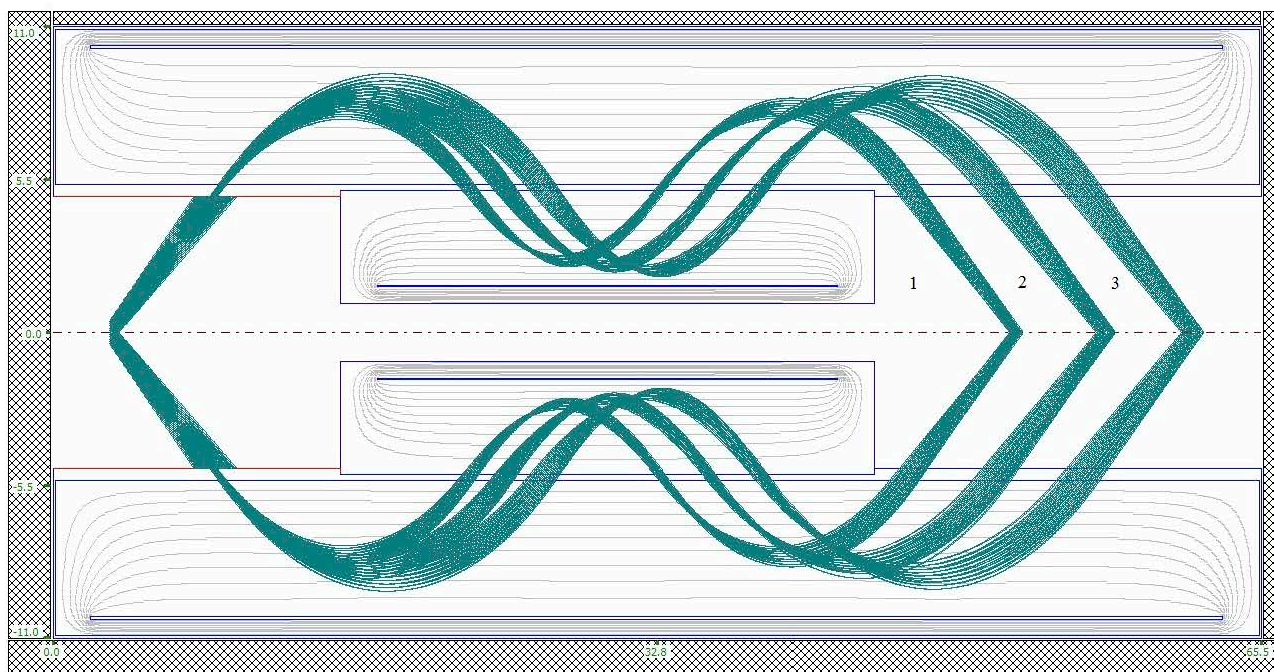


Рисунок 24 - Схематическое изображение траекторий заряженных частиц с различными кинетическими энергиями 1 – $E/V=1,458$, 2 - $E/V=1,62$, 3 - $E/V=1,782$, источник в виде диска $d=8\text{мм}$, начальные углы $40.85^\circ \pm 3.5^\circ$

Таким образом, изучена возможность перевода электронного спектрометра типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» в режим спектрографа. Обоснован выбор его оптимальной конструкции. Полученной модернизированной схемой является конструкция с тремя каскадами и фокусировкой общего вида «ось-ось». Поскольку электроды в ТЦЗА имеет форму цилиндров, усложнение конструкции незначительно. Модернизированный энергоанализатор способен обеспечить высокоточные и экспрессные исследования угловых и энергетических распределений заряженных частиц посредством микроканальной пластины.

3 РАЗРАБОТКА СВЕТОСИЛЬНЫХ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Изучения аналитических характеристик систем, комбинированных из различных электростатических зеркал, показали возможность улучшения их корпускулярно-оптических свойств и расширения их функциональных возможностей по сравнению с одиночными электронными зеркалами.

Известны эффективные энергоанализаторы, построенные путем разнообразной модернизации и комбинирования светосильных цилиндрического и сферического зеркал. В работе [149,150] рассчитаны электронно-оптические характеристики энергоанализаторов, состоящих из последовательно расположенных электростатических зеркал - сферического (СЗ) и цилиндрического (ЦЗ), выделены схемы угловой фокусировки второго порядка.

Одним из светосильных электростатических зеркал является гиперболическое зеркало (ГЗ). Запкварой В.В. и др. рассмотрены два случая фокусировки осесимметричного пучка заряженных частиц в электростатическом гиперболическом поле [40, с.1572]. В планарной плоскости гиперболическое поле является неоднородным и обладает ярко выраженными диспергирующими свойствами. Изучение системы, одним из электронно-оптических элементов которой является электростатическое ГЗ, заслуживает внимания и представляет практический интерес.

Гиперболическое поле также рассмотрено в работе [151], в которой представлен энергоанализатор с осесимметричной структурой поля, аналогичной цилиндрическому полю, но отличающийся от последнего неоднородностью поля вдоль оси симметрии. Разностное поле, соответствующее оптимальной конфигурации анализатора, является суперпозицией гиперболического и цилиндрического полей.

В данном разделе предлагается расчет электронно-оптических характеристик электростатических энергоанализаторов на основе комбинирования электростатических осесимметричных светосильных ГЗ и ЦЗ.

3.1 Энергоанализатор из последовательно расположенных электростатических цилиндрического и гиперболического зеркал

Для поиска анализирующей системы с улучшенными корпускулярно-оптическими параметрами рассмотрим комбинированную систему на базе электростатических полей ЦЗ и ГЗ. Новизной предлагаемой системы энергоанализа является новое взаимное расположение светосильных осесимметричных ЦЗ и ГЗ. В данной схеме пучок частиц проходит через поле ЦЗ, далее через поле ГЗ, при этом отражаясь от внешнего электрода гиперболической формы.

3.1.1 Расчет электронно-оптических характеристик энергоанализатора из последовательно расположенных цилиндрического и гиперболического зеркал

Схема комбинированного энергоанализатора, состоящего из последовательно расположенных электростатических ЦЗ и ГЗ, представлена на рисунке 25. Комбинированный анализатор состоит из точечного источника O' , последовательно расположенных двух зеркал с цилиндрическим (1) и гиперболическим (2) распределением полей и координатного детектора. Поле ГЗ формируется между коническими электродами (4), находящимися под потенциалом Земли и электродом (5) гиперболической формы, под потенциалом, одноименным знаку заряда частиц. Согласно схеме (рисунок 25), из точечного источника O' , расположенного на оси симметрии z системы выходит пучок заряженных частиц и поступает в поле ЦЗ. Далее отражаясь от внешнего цилиндрического электрода, поступает в область поля ГЗ через прозрачные участки конического электрода. Вследствие фокусирующего действия поля ГЗ на пучок частиц на выходе из анализатора образуется точечное изображение O'' на оси симметрии z системы зеркал.

Рассмотрим движение заряженной частицы в электростатическом осесимметричном гиперболическом поле, потенциал которого описывается в цилиндрической системе координат r, z, θ следующим выражением (6) [40, с.1572]

$$U_{ГЗ}(r, z) = U_2 g(r, z), \quad g(r, z) = \left(\frac{r^2}{2} - z^2 \right) \quad (6)$$

Согласно уравнению (6), форма нулевой эквипотенциальной линии при $U_{ГЗ}=0$ определяется выражением $r^2 = 2z^2$, из этого следует, что координаты входа и выхода траектории частицы из поля ГЗ определяются как $r_1^2 = 2z_1^2$, $r_2^2 = 2z_2^2$.

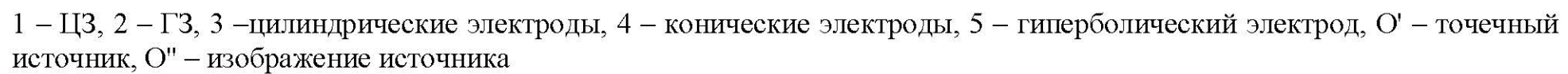
При $U = U_0$ форма отклоняющего электрода гиперболической формы определяется выражением $r^2 = 2 + 2z^2$.

Запишем уравнения движения заряженных частиц в поле ГЗ

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -qU_2 \left(\frac{\partial g}{\partial r} \right) = -qU_2 r, \quad (7a)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -qU_2 \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) = 2qU_2 z. \quad (7b)$$

Проинтегрировав систему уравнений (7) от точки входа $r = r_1, z = -z_1$ в ГЗ до произвольной точки с учетом начальных условий $\dot{r}_1 = v_0 \sin \alpha$, $\dot{z}_1 = v_0 \cos \alpha$, получим дифференциальное уравнение движения частиц в поле ГЗ



55

$$\pm\sqrt{2}\frac{dr}{\sqrt{2S^2 - r^2 + r_1^2}} = \frac{dz}{\sqrt{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z^2 - z_1^2}}, \quad (8)$$

где $S = \sqrt{\frac{W}{qU_2}} \sin \alpha$ - параметр отражения ГЗ, связывающий его геометрические и энергетические характеристики, q и W - заряд и кинетическая энергия анализируемых частиц. Знак (+) в уравнении (8) соответствует участку подъема траектории, знак (-) участку снижения траектории в поле ГЗ. Все продольные параметры будут выражены в единицах радиуса внутреннего цилиндрического электрода r_c . (см.рис.25)

Интегрирование дифференциального уравнения (8) в пределах от r_1 до вершины траектории r_m на участке подъема траектории и от r_m до r_2 на участке снижения, приводит к уравнению плоских траекторий движения заряженных частиц в поле ГЗ

$$\begin{aligned} \pi - \arcsin \frac{z_1}{\sqrt{z_1^2 + S^2}} - \arcsin \frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + S_1^2}} = \\ = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\ln(z_2 + S_1 \operatorname{ctg} \alpha_1) - \ln(-z_1 + S \operatorname{ctg} \alpha) \right] \end{aligned}, \quad (9)$$

где $S_1 = S \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha}$, α_1 - угол выхода траектории из ГЗ.

Угол выхода траектории α_1 частиц из ГЗ вычисляется из уравнения (8) при условии $r^2 = r_2^2$ и $z^2 = z_2^2$

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \sqrt{\frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z_2^2 - z_1^2}{S^2 - z_2^2 + z_1^2}}. \quad (10)$$

Радиальный размах траектории r_m частиц в поле ГЗ можно определить из уравнения (8) при условии $\frac{dr}{dz} = 0$

$$2S^2 - r_m^2 + r_1^2 = 0, \quad r_m^2 = r_1^2 + 2S^2 = 2z_1^2 + 2S^2. \quad (11)$$

Исходя из равенства радиальных координат обеих ветвей траектории в точке поворота $r_m = r_m^{(1)} = r_m^{(2)}$, получим дополнительную формулу для расчета параметров правой ветви траектории в поле ГЗ z_2 , S_1

$$z_2^2 + S_1^2 = z_1^2 + S^2. \quad (12)$$

Для исследования электронно-оптических параметров комбинированной системы зеркал необходимо найти уравнение полной проекции плоской траектории движения заряженных частиц от источника до его изображения на ось симметрии z . Согласно рисунку 25, полная проекция траектории $O'O''$

является суммой проекций траекторий движения частиц в ЦЗ и ГЗ. Параметры проекции траектории частицы в поле ГЗ рассчитываются из уравнений (9) – (12), из которых трансцендентное уравнение (9) решается относительно параметра z_2 методом последовательных приближений варьированием величин α , S , z_1 .

Первая часть проекции $l_1 = l_1/r_c$ соответствует участку $O'O$ (см.рис 25) и является постоянной $l_1 = const$, а вторая часть $l_2 = l_2/r_c$ соответствует участку OO'' . Таким образом, полная проекция в комбинированной системе из ЦЗ и ГЗ определяется следующим выражением:

$$\left. \begin{aligned} l &= l_1 + l_2 \\ l_1 &= l_{ЦЗ} + z_1 + r_1 \operatorname{ctg} \alpha = l_{ЦЗ} + z_1 (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha), \\ l_2 &= z_2 + r_2 \operatorname{ctg} \alpha_1 = z_2 (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha_1), \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

где $l_{ЦЗ} = \frac{l_{ЦЗ}}{r_c}$ является длиной проекции траектории в ЦЗ, определяемой следующим выражением

$$l_{ЦЗ} = 2 \operatorname{ctg} \alpha_1 (1 + 2P_1 \theta_1), \quad (14)$$

где $P_1^2 = \frac{W}{qU_1} \sin^2 \alpha_1$, $\theta_1 = e^{P_1^2} \int_0^{P_1} e^{-x^2} dx$ - параметры отражения ЦЗ [152].

Для анализа электронно-оптических параметров комбинированного анализатора рассчитаны абберрационные коэффициенты, определяемые производными от полной проекции траектории l по углу входа α и величине относительного энергетического разброса в пучке частиц $\Delta \varepsilon = (W - W_0)/W_0$ (где W_0 - начальное значение кинетической энергии частиц). Поиск угловой фокусировки первого порядка $\frac{dl}{d\alpha} = 0$ сводится к определению условия

$\frac{dl_2}{d\alpha} = 0$, т.к. первая часть проекции $l_1 = const$. Величина линейной дисперсии по

энергии, характеризующая величину смещения изображения источника в зависимости от изменения энергии анализируемых частиц, определяется производной l_2 по ε , т.к. $\frac{dl_1}{d\varepsilon} = 0$. Коэффициент угловой дисперсии по энергии

$\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}$, соответствующий величине изменения угла выхода из поля ГЗ в зависимости от изменения энергии частиц, определяется дифференцированием уравнения (10) по ε . Ниже приведены уравнения основных абберрационных коэффициентов, определяющих параметры комбинированной системы зеркал

$$\frac{dl_2}{d\alpha} = (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dz_2}{d\alpha} - \sqrt{2} z_1 (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) \frac{d\alpha_1}{d\alpha}, \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dz_2}{d\alpha} = \frac{dz_1}{d\alpha} & \left(\sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha \frac{z_1^2 - S^2}{z_1^2 + S^2} - \frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z_1^2}{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right) + \\ & + 2z_1 S^2 \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{\sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha}{z_1^2 + S^2} + \frac{1}{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{d\alpha_1}{d\alpha} = 1 + \frac{z_1}{S^2 \operatorname{ctg} \alpha} \left(\frac{dz_1}{d\alpha} + \frac{dz_2}{d\alpha} \right) \quad \frac{dz_1}{d\alpha} = \frac{\sqrt{2} z_1 (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha) - A_1}{(1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha)}, \quad (17)$$

и

$$\frac{dl_2}{d\varepsilon} = (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dz_2}{d\varepsilon} - \sqrt{2} z (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) \frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dz_2}{d\varepsilon} = \frac{dz_1}{d\varepsilon} & \left(\sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha \frac{z_1^2 - S^2}{z_1^2 + S^2} - \frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z_1^2}{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right) + \\ & + z_1 S^2 \operatorname{ctg} \alpha \left(\frac{\sqrt{2}}{z_1^2 + S^2} - \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - z_1^2} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon} = \frac{z_1}{S^2 \operatorname{ctg} \alpha} \left(\frac{dz_1}{d\varepsilon} + \frac{dz_2}{d\varepsilon} \right) \quad \frac{dz_1}{d\varepsilon} = \frac{-A_2}{1 + \sqrt{2} \operatorname{ctg} \alpha}, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= 4P_1^2(1 + 2P_1\theta_1)\operatorname{ctg}^2\alpha_1 - 4P_1\theta_1 - 2(1 + \operatorname{ctg}^2\alpha_1) \\ A_2 &= 2\operatorname{ctg}\alpha_1 [P_1\theta_1 + P_1^2(1 + 2P_1\theta_1)] \end{aligned} \quad (21)$$

- абберационные коэффициенты ЦЗ [152, с.137].

В таблице 2 представлены результаты расчета основных электронно-оптических параметров комбинированного анализатора, рассчитанные в условиях угловой фокусировки первого порядка $\frac{dl_1}{d\varepsilon} = 0$. Здесь даны значения следующих величин: α – угол входа, z_1 – продольная координата входа траектории частиц в поле ГЗ, S_1 – параметр отражения ГЗ, P_1 – параметр отражения ЦЗ, r_m – радиальная координата траектории в полях ЦЗ и ГЗ, l – полная проекция траектории частиц на ось симметрии системы от источника до его изображения, $d\alpha_1/d\varepsilon$ – коэффициент угловой дисперсии по энергии, D – линейная дисперсия по энергии.

Таблица 2 - Электронно-оптические характеристики комбинированного анализатора из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ в режиме угловой фокусировки первого порядка

α (град.)	z_1	S_1	P_1	r_m (ЦЗ)	r_m (ГЗ)	l	$\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}$	D
35	0,30	0,2704	0,7273	1,697	0,571	9,019	-14,330	27,553
	0,40	0,3605	0,7404	1,730	0,762	9,844	-11,696	30,143
	0,50	0,4507	0,7527	1,762	0,952	10,664	-10,111	32,721
	0,60	0,5408	0,7643	1,794	1,142	11,478	-9,051	35,283
	0,70	0,6309	0,7753	1,824	1,333	12,289	-8,291	37,833
	0,80	0,7211	0,7856	1,854	1,523	13,095	-7,718	40,368
	0,90	0,8112	0,7955	1,883	1,714	13,898	-7,270	42,894
	1,00	0,9013	0,8048	1,911	1,904	14,697	-6,911	45,410
40	0,30	0,3099	0,7882	1,861	0,610	8,551	-19,579	33,574
	0,40	0,4132	0,8023	1,904	0,813	9,329	-15,912	36,500
	0,50	0,5165	0,8154	1,944	1,017	10,100	-13,702	39,400
	0,60	0,6198	0,8277	1,984	1,220	10,866	-12,221	42,275
	0,70	0,7231	0,8392	2,022	1,423	11,626	-11,159	45,130
	0,80	0,8264	0,8501	2,060	1,627	12,382	-10,359	47,970
	0,90	0,9297	0,8604	2,097	1,830	13,133	-9,731	50,783
	1,00	1,0330	0,8702	2,132	2,033	13,880	-9,228	53,592
45	0,30	0,3559	0,8659	2,117	0,658	9,279	-28,481	45,376
	0,40	0,4746	0,8805	2,171	0,878	9,265	-23,047	49,049
	0,50	0,5932	0,8940	2,224	1,097	10,748	-19,771	52,683
	0,60	0,7118	0,9067	2,275	1,317	11,480	-17,572	56,268
	0,70	0,8305	0,9184	2,325	1,536	12,206	-15,992	59,822
	0,80	0,9491	0,9295	2,373	1,755	12,927	-14,800	63,341
	0,90	1,0678	0,9400	2,420	1,975	13,643	-13,867	66,834
	1,00	1,1864	0,9499	2,465	2,194	9,279	-13,115	70,303

Из анализа полученных результатов установлено, что в комбинированном энергоанализаторе из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ, в широком интервале значений параметров угла входа α , параметров отражений зеркал P_1 , S реализуется режим угловой фокусировки первого порядка. Отличительным свойством предлагаемой комбинированной системы является наличие больших значений коэффициентов угловой дисперсии $d\alpha_1/d\varepsilon$ и линейной дисперсии D по энергии. Это свойство комбинированной системы приводит к расширению его аналитических возможностей, и представляет практический интерес.

Для большинства приведенных электронно-оптических схем линейная дисперсия системы на порядок больше линейной дисперсии одиночного зеркала, к примеру, линейная дисперсия для ЦЗ составляет 5,6 [152, с.137]. Сочетание большой величины линейной дисперсии по энергии с угловой фокусировкой первого порядка позволяет использовать предлагаемую систему зеркал в качестве анализатора энергий с высокой разрешением.

Абсолютная величина угловой дисперсии по энергии для многих схем довольно велика и находится в пределах значений 10 – 20, что соответствует изменению угла выхода частиц на $5 - 12^\circ$ при изменении кинетической энергии частиц на 1%. Это качество позволяет использовать комбинированную систему зеркал при небольшой угловой расходимости пучка в аксиальной плоскости в качестве анализатора энергий для одновременной регистрации конечного диапазона энергий посредством координатного детектора.

Располагая координатный детектор за фокусом в перпендикулярной оси симметрии плоскости, согласно работам [153, 154], можно одновременно регистрировать как энергетическое, так и угловое распределение заряженных частиц в пучке.

Таким образом, определено уравнение полной проекции траектории движения заряженных частиц в комбинированной системе из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ. Рассчитаны электронно-оптические схемы комбинированного анализатора, в которых реализуется угловая фокусировка первого порядка расходящихся пучков частиц. Определено, что в режиме угловой фокусировки первого порядка, комбинированная система из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ обладает большими значениями коэффициентов угловой и линейной дисперсий по энергии.

3.1.2 Моделирование электронно-оптической схемы комбинированного энергоанализатора из последовательно расположенных электростатических цилиндрического и гиперболического зеркал

Синтез электронно-оптических систем сложной структуры, отвечающих заданным требованиям, практически неосуществим без этапа предварительного численного моделирования и анализа, это позволяет в реальное время рассмотреть десятки вариантов искомой конструкции электронно-оптической системы, не прибегая при этом к созданию опытных образцов. Таким образом, значительно расширяются границы возможного поиска оптимальной

конструкции электронно-оптической системы, что позволяет оценить ее параметры, которые трудно измерить или невозможно измерить с требуемой точностью [107, с.97].

Численное моделирование электронно-оптических систем традиционно включает в себя такие разделы, как моделирование электростатических полей и вычисление траекторий заряженных частиц в этих полях. Численное моделирование в отличие от аналитического обладает рядом преимуществ, основным из которых является более низкий уровень идеализации реальных конструкций энергоанализаторов [155].

В работе для подтверждения достоверности расчетов по аналитическим формулам, проведен анализ электронно-оптической схемы энергоанализатора комбинированного из последовательно расположенных электростатических ЦЗ и ГЗ с помощью программы «Фокус» моделирования аксиально-симметричных систем корпускулярной оптики [156].

На рисунке 26 изображено распределение электростатического поля в комбинированном энергоанализаторе из последовательно расположенных электростатических ЦЗ и ГЗ. На рисунке 27 приведено трехмерное изображение сечения электростатического поля в комбинированной системе зеркал.

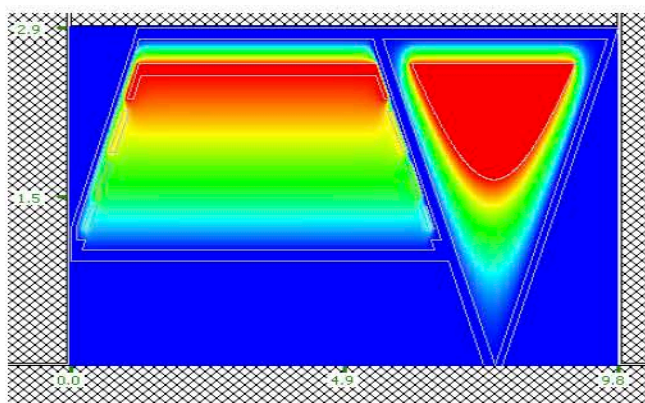


Рисунок 26 - Распределение электростатического поля в комбинированном энергоанализаторе

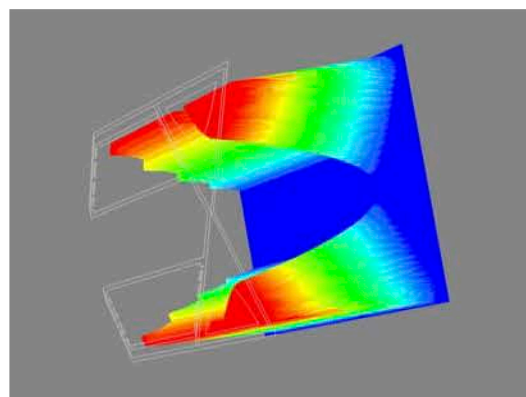
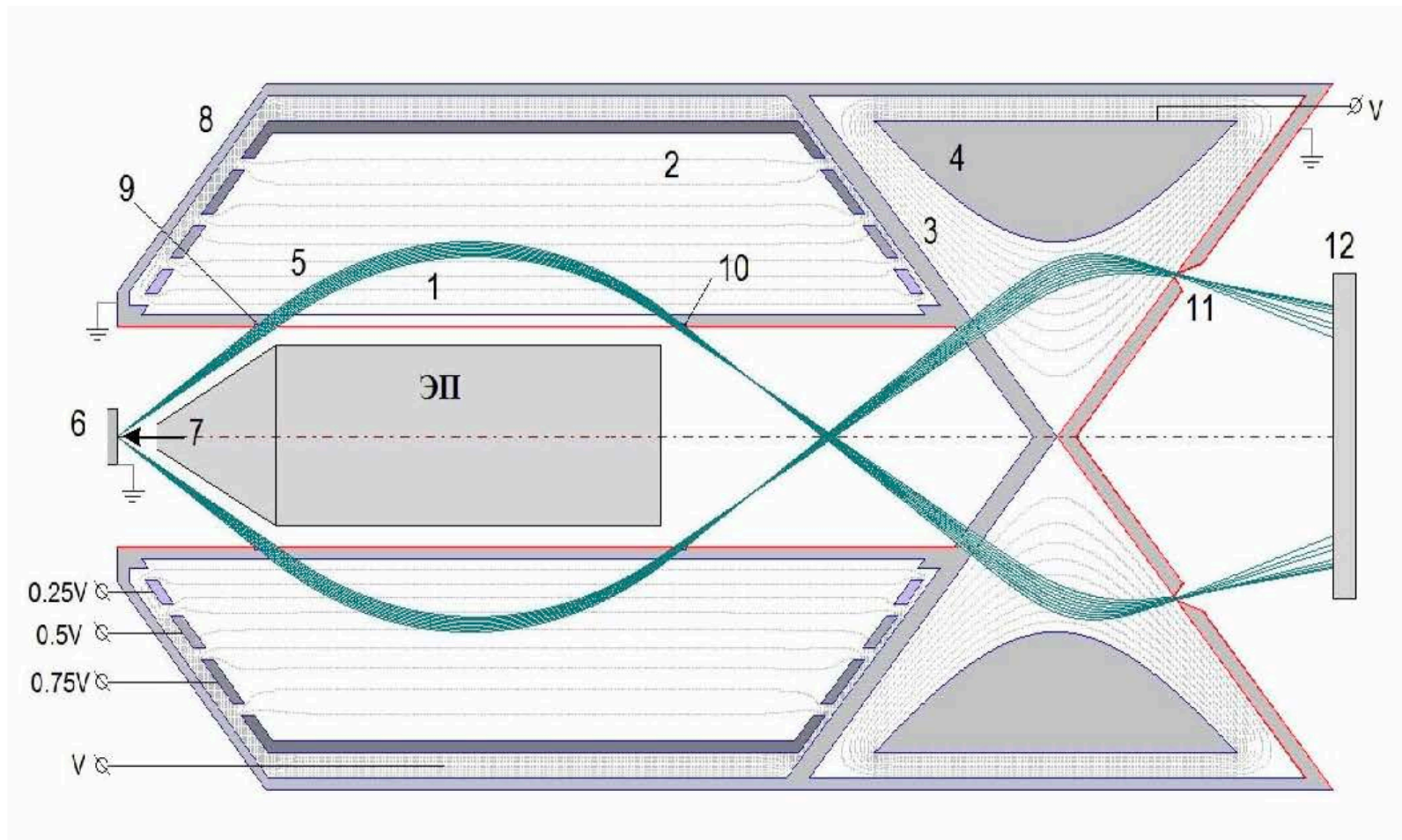


Рисунок 27 - Трехмерное изображение сечения поля в комбинированном энергоанализаторе

Рисунок 28 представляет множество траекторий вторичных электронов в электронно-оптической схеме комбинированного энергоанализатора из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ. Общая протяженность электронно-оптической системы – 9,8. Радиусы внутреннего (1) и внешнего (2) электродов ЦЗ соответственно 1 и 2,5. Потенциалы гиперболического электрода (4) и внешнего электрода ЦЗ равны 1. Внутренний электрод ЦЗ и конические электроды (3) под нулевым потенциалом. Асимптоты гиперболического электрода имеют угол $\beta = \arctg \sqrt{2} = 54,40$ [157]. Все размеры выражены в условных единицах.



1 – внутренний цилиндр, 2 – внешний цилиндр, 3 – конические электроды, 4 – гиперболический электрод, 5 – вторичные электроны, 6 – исследуемый образец, 7 – первичные электроны, 8 – магнитный экран, 9 – входное окно, 10 – выходное окно, 11 – выходная диафрагма, 12 – детектор, ЭП – электронная пушка

Рисунок 28 – Ход траекторий электронов в электронно-оптической схеме комбинированного энергоанализатора из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ

Отмеченные параметры являются определяющими для задания геометрических параметров электродов. Основными элементами ЦЗ служат два коаксиальных цилиндрических электрода с различными радиусами. С целью коррекции краевого поля с торцов цилиндрических электродов размещены корректирующие кольца под потенциалами (в долях от потенциала внешнего цилиндра V) в соответствии с логарифмическим законом изменения цилиндрического поля с радиусом. Например, в случае трех пар корректирующих колец их потенциалы имеют следующие значения – $0.25V$, $0.5V$ и $0.75V$. Диапазон начальных углов вылета частиц из образца $37^\circ \pm 2^\circ$. При расчетах шаг изменения угла был равен $0,5^\circ$. Положение источника в используемой в расчетах системе координат – $x = 0$; $y = 0$. Ширины входной и выходной щелей на внутреннем цилиндрическом электроде, соответственно равны $0,177$ и $0,089$. Отношение энергии заряженной частицы к максимальному потенциалу $E/V=1.3$. Изменяя потенциал V можно проанализировать весь спектр энергий E вторичных электронов. Непрозрачные отрезки электродов в программе закрашиваются красным цветом.

Согласно рисунку 28, вторичные электроны (5), возбужденные из исследуемого образца (6) первичными электронами (7), через входное окно (9) во внутреннем цилиндре (1) ЦЗ, покрытое металлической сеткой высокой прозрачности, попадают в поле ЦЗ, отражаются от него, и далее поступают в поле ГЗ. Электроны, прошедшие сквозь выходную диафрагму (11), попадают на детектор (12) и таким образом регистрируются. В результате фокусирующего действия двух зеркал на пучок электронов осуществляется кольцевое изображение источника на поверхности конического электрода ГЗ. Таким образом, в предложенной системе выполняется угловая фокусировка первого порядка типа «ось-кольцо». Как видно из рисунка 28, при таких параметрах все анализируемые электроны попадают в щель и достигают детектора. Изображение имеет большой радиус и предопределяет большие размеры детектора, что положительно сказывается на его времени срабатывания и практического отсутствия мертвого времени [158].

На рисунке 29 приведено увеличенное изображение траекторий движения заряженных частиц при прохождении выходной диафрагмы (11). На рисунке 30 представлены конструкция комбинированного энергоанализатора в различных сечениях, полученная с помощью программы AutoCAD.

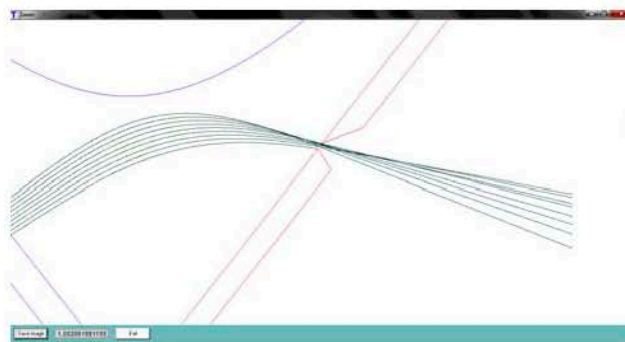


Рисунок 29 - Увеличенное изображение траекторий движения частиц при прохождении выходной диафрагмы

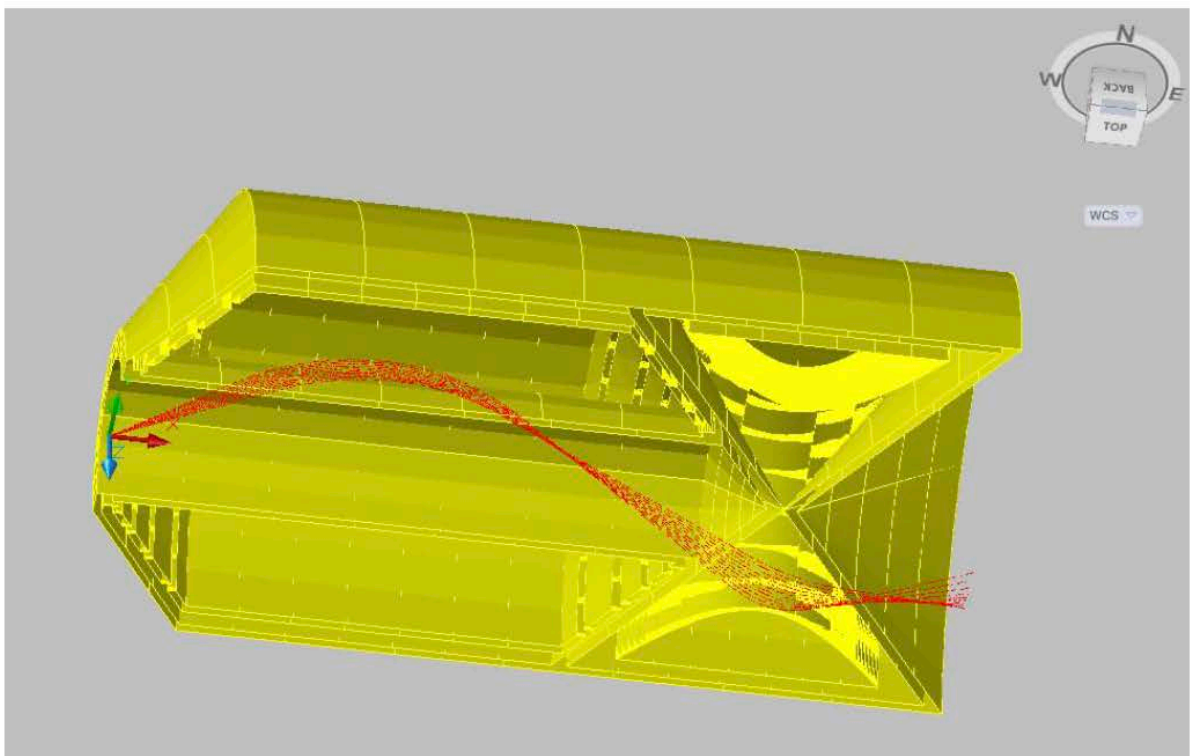
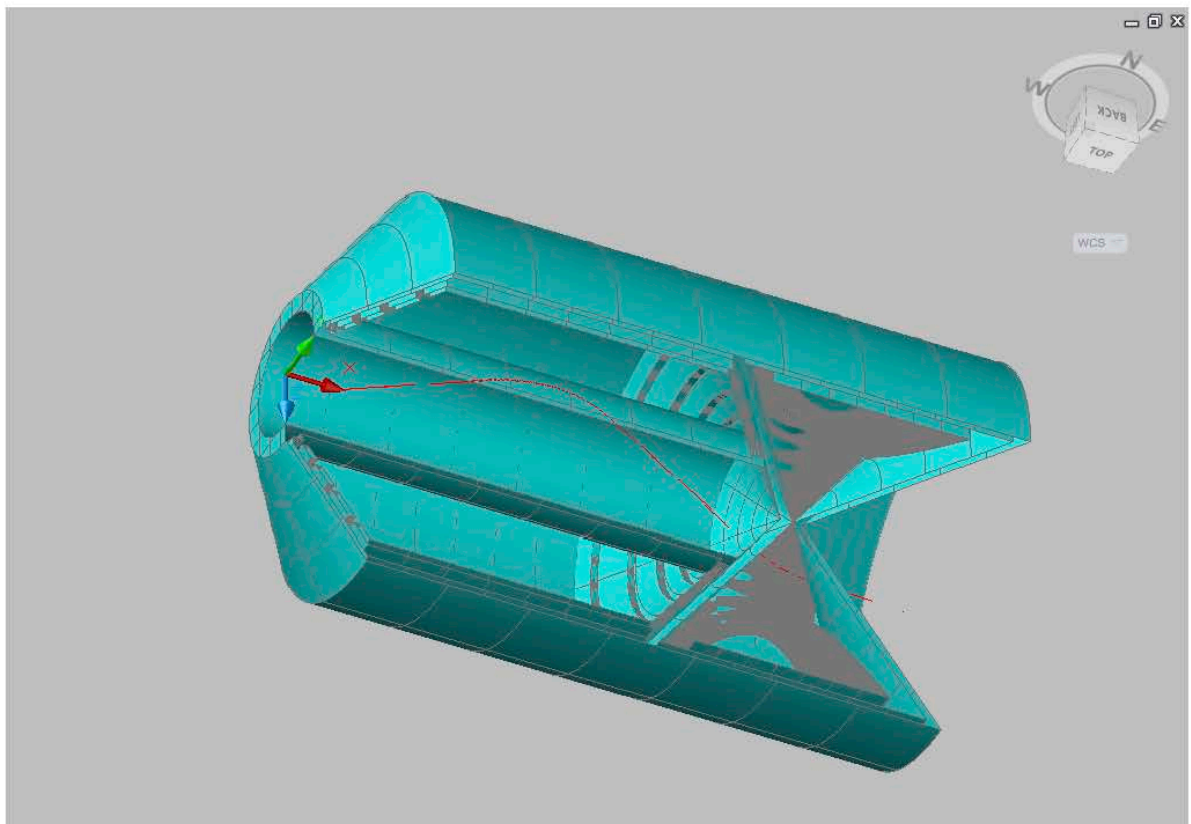


Рисунок 30 - Трехмерные виды конструкции комбинированного энергоанализатора (в сечениях 270° и 180°)

Для расчета аппаратной функции комбинированной системы из ЦЗ и ГЗ запускаются электроны из точечного источника в диапазоне начальных углов $37,5 \pm 2,5^\circ$ и в диапазоне энергий (точнее E/V) 1.27-1.33. На рисунке 31 показаны траектории заряженных частиц в указанных диапазонах начальных углов и энергий при расчете аппаратной функции. На рисунке 32 представлена аппаратная функция комбинированной системы на основе электростатических ЦЗ и ГЗ [159].

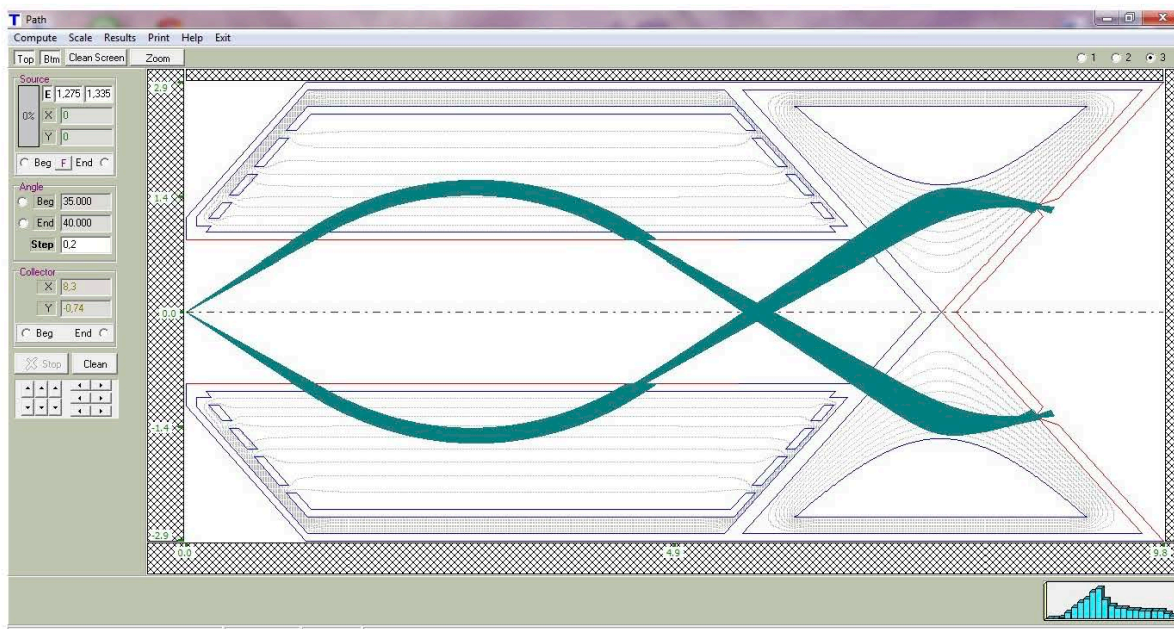


Рисунок 31 – Траектории заряженных частиц при расчете аппаратной функции в схеме из ЦЗ и ГЗ, кинетические энергии 1.27-1.33 эВ/В, начальные углы $37,5 \pm 2,5^\circ$, источник точечный

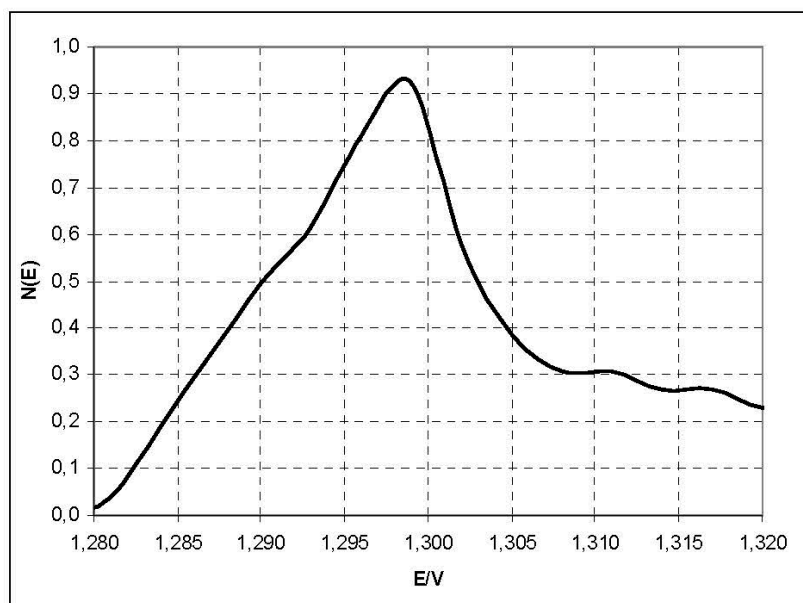


Рисунок 32 - Аппаратная функция комбинированной системы из последовательно расположенных ЦЗ и ГЗ

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции комбинированного энергоанализатора с радиусом выходной диафрагмы $0.036R_{in}$ составляет 2,9% при светосиле $\Omega/2\pi=5,31\%$.

Таким образом, разработана численная модель комбинированного анализатора на основе электростатических цилиндрического и гиперболического зеркал, в которой реализуется фокусировка первого порядка типа «ось-кольцо». Рассчитана аппаратная функция прибора.

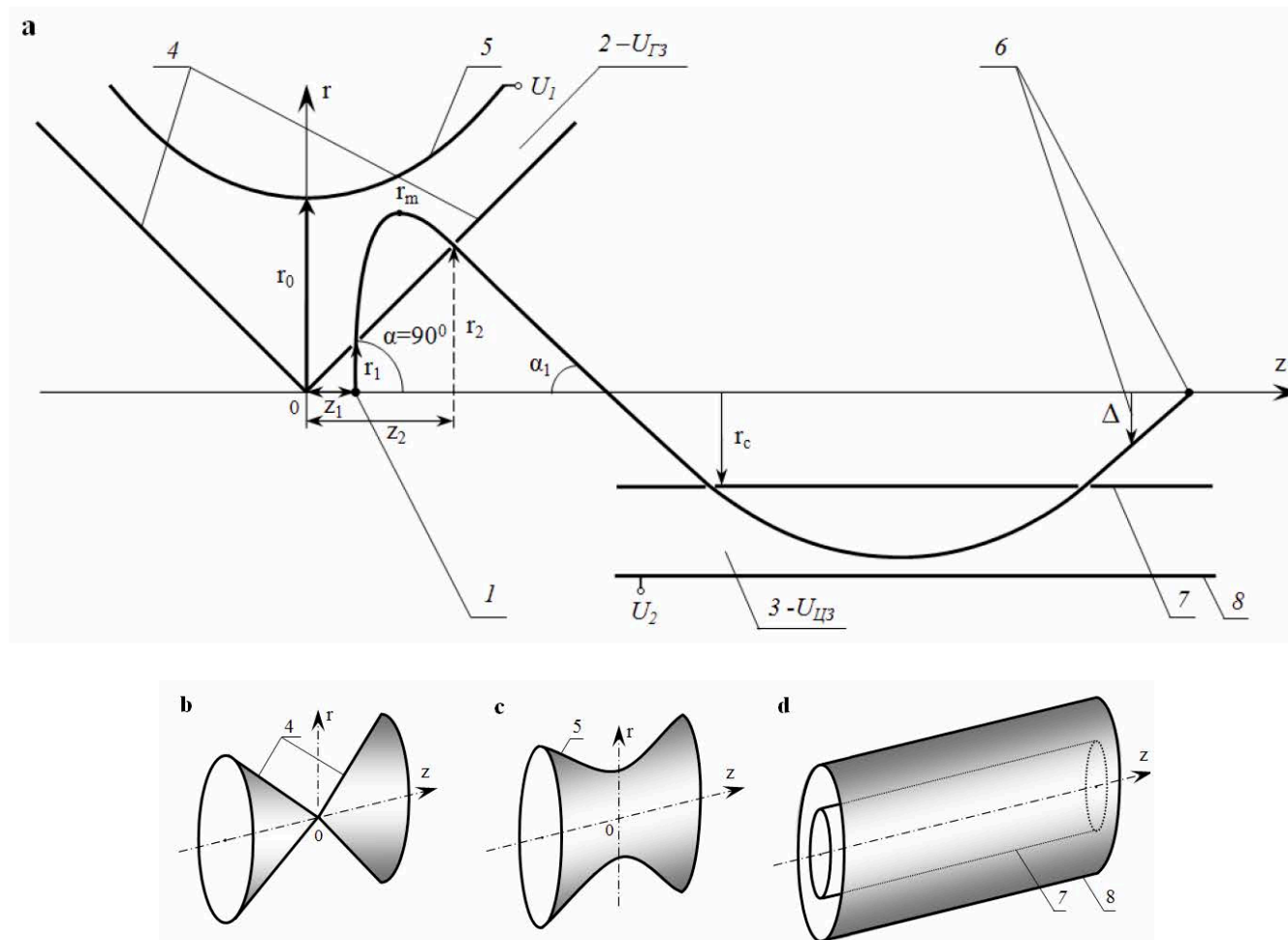
3.2 Электронно-оптическая схема электростатического энергоанализатора из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал

В данном разделе работы предлагается расчет электронно-оптических характеристик электростатического энергоанализатора, комбинированного из последовательно расположенных гиперболического и цилиндрического зеркал (ЦЗ). Новизной предлагаемого устройства является новое взаимное расположение электронных зеркал в двухкаскадном энергоанализаторе, допускающее ввод пучка заряженных частиц в поле гиперболического зеркала под углами, близкими к прямому углу.

3.2.1 Расчет электронно-оптических характеристик комбинированной системы из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал

Схема комбинированного зеркального энергоанализатора из последовательно расположенных ГЗ и ЦЗ представлена на рисунке 33. Анализатор состоит из точечного источника (1), последовательно расположенных зеркал с гиперболическим (2) и цилиндрическим (3) распределением полей и детектора. ГЗ формируется между двумя коническими электродами (4), находящимися под нулевым потенциалом, и электродом гиперболической формы (5), имеющим потенциал, одноименный заряду частиц.

На рисунке 33(а) показано сечение системы плоскостью r,z . Здесь для ГЗ изображена только верхняя половина, симметричная относительно оси z , а для ЦЗ только нижняя половина также симметричная относительно оси z . Осесимметричное гиперболическое поле получается вращением конических электродов (рис.33b) и гиперболического электрода (рис.33c) вокруг оси z , а осесимметричное цилиндрическое поле - вращением электродов (7) и (8) вокруг оси z (рис.33d). Пучок заряженных частиц выходит из точечного источника, расположенного на оси симметрии z комбинированной системы, и поступает в область поля ГЗ через прозрачные участки конического электрода. Пучок отражаясь от гиперболического электрода, проходит вновь через конический электрод и далее поступает в ЦЗ. На выходе из ЦЗ формируется кольцевое или точечное изображение (6) на оси симметрии z .



(a) Энергоанализатор в сечении плоскостью r, z : 1 – источник пучка заряженных частиц, 2 – ГЗ, 3 – ЦЗ, 4 – прозрачные конические электроды, 5 – гиперболический электрод, 6 – изображение источника, 7 – внутренний цилиндрический электрод, 8 – внешний цилиндрический электрод. (b) Конические электроды. (c) Гиперболический электрод. (d) ЦЗ

Рисунок 33 - Схема комбинированного зеркального энергоанализатора из последовательно расположенных ГЗ и ЦЗ

Рассмотрим движение заряженной частицы в электростатическом осесимметричном гиперболическом поле, потенциал которого описывается в цилиндрической системе координат r, z, φ следующим выражением (22) [40, с.1572]

$$U_{\Gamma 3}(r, z) = U_1 g(r, z), \quad g(r, z) = \left(\frac{r^2}{2} - \frac{z^2}{2} \right). \quad (22)$$

Форма нулевой эквипотенциальной линии, согласно уравнению (22), при $U_{\Gamma 3} = 0$, определяется выражением $r^2 = z^2$, из чего следует, что координаты входа и выхода траектории частиц из $\Gamma 3$ определяются как $r_1^2 = z_1^2$, $r_2^2 = z_2^2$.

Запишем уравнения движения заряженных частиц в поле $\Gamma 3$

$$m \frac{dr}{dt} = -qU_1 \left(\frac{\partial g}{\partial r} \right) = -qU_1 r, \quad (23a)$$

$$m \frac{dz}{dt} = -qU_1 \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) = qU_1 z. \quad (23b)$$

где q заряд анализируемых частиц.

Интегрирование системы уравнений (23) с учетом начальных условий $r_A = v_0 \sin \alpha$, $z_A = v_0 \cos \alpha$ приводит к дифференциальному уравнению движения частиц,

$$\pm \frac{dr}{\sqrt{S^2 - r^2 + r_1^2}} = \frac{dz}{\sqrt{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z^2 - z_1^2}} \quad (24)$$

где $S = \sqrt{2 \frac{W}{qU_1}} \sin \alpha$ - параметр отражения $\Gamma 3$, связывающий его геометрические и энергетические характеристики. Параметр W соответствует кинетической энергии частиц. Знак (+) в уравнении (24) соответствует участку подъема траектории частиц, знак ($\square$) - участку снижения траектории в поле $\Gamma 3$. Все продольные параметры будут выражены в единицах центрального радиуса r_0 отклоняющего электрода $\Gamma 3$ (см.рис.33).

Интегрируя дифференциальное уравнение движения (24) в пределах от r_1 до вершины траектории r_m на участке подъема траектории от r_m до r_2 на участке снижения, найдем уравнение, связывающее точки входа z_1 и выхода z_2 траектории из $\Gamma 3$

$$\begin{aligned} \pi - \arcsin \frac{z_1}{\sqrt{S^2 + z_1^2}} - \arcsin \frac{z_2}{\sqrt{S_1^2 + z_2^2}} &= \\ &= \ln(z_2 + S_1 \operatorname{ctg} \alpha_1) - \ln(z_1 + S \operatorname{ctg} \alpha) \end{aligned} \quad (25)$$

где $S_1 = S \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha}$.

Угол выхода траектории α_1 из поля ГЗ вычисляется из уравнения (24) при условии $r^2 = r_2^2$ и $z^2 = z_2^2$

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \sqrt{\frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha + z_2^2 - z_1^2}{S^2 - z_2^2 + z_1^2}}. \quad (26)$$

Радиальная координата точки поворота траектории r_m в поле ГЗ определяется из уравнения (24) при условии $\frac{dr}{dz} = 0$

$$S^2 - r_m^2 + r_1^2 = 0, \quad r_m^2 = S^2 + r_1^2. \quad (27)$$

Равенство радиальных координат обеих ветвей траектории в точке поворота $r_m = r_m^{(1)} = r_m^{(2)}$ дает дополнительную формулу для расчета характеристик правой ветви траектории в поле ГЗ z_2, S_1

$$z_2^2 + S_1^2 = z_1^2 + S^2. \quad (28)$$

Для изучения характеристик комбинированной системы необходимо определить выражение для проекции плоской траектории движения заряженных частиц на ось симметрии z от источника до его изображения как функцию параметров системы зеркал. Эта величина, согласно рисунку 33, есть сумма проекций траекторий движения в ГЗ и ЦЗ. Параметры проекции траектории частиц в ГЗ рассчитываются из уравнений (25) – (28), в которых решение трансцендентного уравнения (25) определяется методом последовательных приближений с варьированием величин S, z_1, z_2 . Проекция траектории движения в электростатическом ЦЗ рассчитывалась в соответствии с выводами работы [152, с.134]. Полная проекция в системе ГЗ и ЦЗ

$$l = l_{ГЗ} + l_{ЦЗ}, \quad l_{ГЗ} = z_2 (1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) - z_1, \\ l_{ЦЗ} = \frac{l_{ЦЗ}}{r_0} = \mu \operatorname{ctg} \alpha_1 (2 + 4P_1 \theta_1 - \Delta), \quad (29)$$

Здесь $P_1^2 = \frac{W}{qU_2} \sin^2 \alpha_1$, $\theta_1 = e^{P_1^2} \int_0^{P_1} e^{-x_1^2} dx$ - параметры отражения ЦЗ, Δ - величина удаления изображения от оси энергоанализатора z , $\mu = \frac{r_c}{r_0}$ - коэффициент, определяющий величину радиуса r_c внутреннего цилиндрического электрода в

единицах r_0 , радиус вершины траектории в поле ЦЗ определялся по формуле $r_m = \mu \exp(P_1^2)$.

Далее выполнен расчет aberrаций, определяющих условия фокусировки пучка заряженных частиц в предложенной комбинированной системе зеркал. Если в поле анализатора влетает пучок частиц с разбросом по углу в аксиальной плоскости $\pm \Delta\alpha$ и разбросом по энергии $\Delta\varepsilon = (W - W_0)/W_0$ (где W_0 основное значение кинетической энергии частиц), то величину полной проекции траектории l можно разложить в ряд Тейлора, считая $\Delta\alpha$ и $\Delta\varepsilon$ малыми возмущениями [152, с. 134]

$$l = l_0 + \frac{\partial l}{\partial \alpha} \Delta\alpha + \frac{\partial l}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 l}{\partial \alpha^2} (\Delta\alpha)^2 + K \quad (30)$$

Угловая фокусировка первого порядка выполняется при $\frac{\partial l}{\partial \alpha} = 0$, угловая фокусировка второго порядка выполняется при соблюдении условия $\frac{\partial l}{\partial \alpha} = \frac{\partial^2 l}{\partial \alpha^2} = 0$. Величина $\Delta l = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon} \Delta\varepsilon$ в уравнении (30) характеризует дисперсионные свойства и определяет величину смещения изображения при изменении энергии пучка частиц.

Ниже приведены уравнения коэффициентов, определяющих aberrации первого порядка $\frac{dl}{d\alpha}$ и дисперсию $\frac{dl}{d\varepsilon}$ комбинированной системы зеркал:

$$\frac{dl}{d\alpha} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{dz_2}{d\alpha} + f \frac{d\alpha_1}{d\alpha} \quad (31)$$

где

$$(1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{dz_2}{d\alpha} = S \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \alpha_1 \frac{z_1 S_1 + z_2 S}{z_1^2 + S^2} + \frac{S^2 \operatorname{ctg} \alpha}{b_1} - \frac{S S_1 \operatorname{ctg} \alpha_1}{b}, \quad (32)$$

$$f = 4\mu\omega \operatorname{ctg}^2 \alpha_1 - (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) [z_2 + \mu(2 + 4P_1\theta_1 - \Delta)], \quad (33)$$

$$\frac{d\alpha_1}{d\alpha} = \frac{S^2 \operatorname{ctg} \alpha_1 - z_2 \frac{dz_2}{d\alpha}}{S_1^2 \operatorname{ctg} \alpha_1}, \quad (34)$$

$$\omega = P_1\theta_1 + P_1^2 (1 + 2P_1\theta_1), \quad b = z_1 + S \operatorname{ctg} \alpha, \quad b_1 = z_2 + S_1 \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad (35)$$

и

$$\frac{dl}{d\varepsilon} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{dz_2}{d\varepsilon} + 2\mu\omega \operatorname{ctg} \alpha_1 + f \frac{d\alpha_1}{d\varepsilon}, \quad (36)$$

где

$$(1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{dz_2}{d\varepsilon} = \frac{1}{2} \left[S \operatorname{ctg} \alpha_1 \frac{z_1 S_1 + z_2 S}{z_1^2 + S^2} - \frac{S^2}{b_1} \operatorname{ctg}^2 \alpha - \frac{SS_1}{b} \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \alpha_1 \right], \quad (37)$$

$$\frac{d\alpha_1}{d\varepsilon} = \frac{S^2 - S_1^2}{2S_1^2 \operatorname{ctg} \alpha_1} - \frac{z_2}{S_1^2 \operatorname{ctg} \alpha_1} \frac{dz_2}{d\varepsilon}. \quad (38)$$

Величина абберационного коэффициента определяется из следующих уравнений

$$\frac{d^2 l}{d\alpha^2} = (1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{d^2 z_2}{d\alpha^2} - (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) \frac{dz_2}{d\alpha} \frac{d\alpha_1}{d\alpha} + \frac{df}{d\alpha} \frac{d\alpha_1}{d\alpha} + f \frac{d^2 \alpha_1}{d\alpha^2}, \quad (39)$$

где

$$(1 + \operatorname{ctg} \alpha_1) \frac{d^2 z_2}{d\alpha^2} = (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) \frac{d\alpha_1}{d\alpha} \frac{dz_2}{d\alpha} + f_1 + f_2 + f_3, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\alpha} = & 4\mu \frac{d\omega}{d\alpha} \operatorname{ctg}^2 \alpha - (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) \frac{dz_2}{d\alpha} + \operatorname{ctg} \alpha_1 (1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha_1) + \\ & + \frac{d\alpha_1}{d\alpha} [2z_2 + \mu(4 + 8P_1\theta_1 - 2\Delta) - 12\mu\omega] \end{aligned}, \quad (41)$$

$$\frac{d^2 \alpha_1}{d\alpha^2} = \frac{1}{S_1^2 \operatorname{ctg} \alpha_1} \left[S^2 (\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1) - \left(\frac{dz_2}{d\alpha} \right)^2 - z_2 \frac{d^2 z_2}{d\alpha^2} \right] + \frac{(1 - \operatorname{ctg}^2 \alpha)}{\operatorname{ctg} \alpha_1} \left(\frac{d\alpha_1}{d\alpha} \right)^2 \quad (42)$$

$$\frac{d\omega}{d\alpha} = \left[\omega (1 + 2P_1^2) + 2P_1^2 (1 + 2P_1\theta_1) \right] \frac{d\alpha_1}{d\alpha} \operatorname{ctg} \alpha_1 \quad (43)$$

$$\begin{aligned} f_1 = & -S \operatorname{ctg} \alpha_1 \frac{z_1 S_1 + z_2 S}{z_1^2 + S^2} \times \left[1 + \frac{\operatorname{ctg} \alpha (1 + \operatorname{ctg} \alpha_1)}{\operatorname{ctg} \alpha_1} \frac{d\alpha_1}{d\alpha} + \right. \\ & \left. + 2 \frac{S^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha}{z_1^2 + S^2} \right] + \frac{S \operatorname{ctg} \alpha_1}{z_1^2 + S^2} \left[z_1 S_1 \operatorname{ctg} \alpha \frac{d\alpha_1}{d\alpha} + S \frac{dz_2}{d\alpha} + z_2 S \operatorname{ctg} \alpha \right] \end{aligned} \quad (44)$$

$$f_2 = \frac{S^2}{b_1}(\operatorname{ctg} \alpha - 1) - \frac{S^2 \operatorname{ctg} \alpha_1}{b_1^2} \left(\frac{dz_2}{d\alpha} - S_1 \frac{d\alpha_1}{d\alpha} \right) \quad (45)$$

$$f_3 = -\frac{SS_1 \operatorname{ctg} \alpha_1}{b} \left(\operatorname{ctg} \alpha + \frac{S}{b} \right) + \frac{SS_1}{b} \quad (46)$$

Для анализа фокусирующих и дисперсионных свойств комбинированной системы по формулам (31) – (46) были рассчитаны электронно-оптические параметры, удовлетворяющие условиям угловой фокусировки второго порядка

$\left. \frac{dl}{d\alpha} \right|_{\alpha=90^0} = \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 l}{d\alpha^2} \right|_{\alpha=90^0} = 0$. Результаты расчета даны в таблице 3, здесь

представлены следующие величины: $\mu = \frac{r_c}{r_0}$ и z_1, z_2 (см. рис.33), S, S_1 –

параметры отражения ГЗ, P – параметр отражения ЦЗ, r_m (ГЗ) и r_m (ЦЗ) – радиусы точек поворота траектории, α_1 – угол выхода траектории из поля ГЗ, Δ – величина удаления изображения от оси симметрии комбинированной системы

зеркал, $D = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon}$ – относительная линейная дисперсия по энергии, $l = \frac{l}{r_0}$ – полная

проекция траектории на ось симметрии зеркала от источника до его изображения, соответствующая режиму угловой фокусировки второго порядка.

Из анализа данных таблицы 3 видно, что в анализаторе комбинированном из двух светосильных ЦЗ и ГЗ, режим угловой фокусировки второго порядка осуществляется в широком интервале значений параметров μ, S, z_1, z_2 для схем 0p Δ p 1. Схемы анализаторов с Δ f 1 не имеют практического смысла, т.к. изображение источника оказывается в области поля ЦЗ. Практически реализуемыми могут быть схемы с 0p Δ p 1.

В таблице 3 даны параметры двух анализаторов с $\Delta = 1$, в которых пучок заряженных частиц, выходящий из точечного источника, фокусируется в точку на оси симметрии анализатора. Параметры фокусировки «ось-ось» выделены в таблице 3 жирным шрифтом. Схема комбинированной системы зеркал, приведенная на рисунке 33, соответствует параметрам: $\alpha=90^0, z_1=0,2, z_2=0,9114, S=1,2700, S_1=0,9068, P=0,9587$.

Отличительной особенностью данного энергоанализатора на основе системы светосильных зеркал является реализация условий угловой фокусировки второго порядка для множества электронно-оптических схем. Возможность варьирования свободных параметров μ, S, z_1, z_2 предлагает широкий выбор для разработки разнообразных схем угловой фокусировки, часть из которых предложена в таблице 3. Это качество комбинированного анализатора представляет интерес, так как приводит к расширению аналитических возможностей прибора.

Таблица 3 - Электронно-оптические характеристики схем угловой фокусировки второго порядка комбинированной системы из последовательно расположенных ГЗ и ЦЗ

№	z_2	S	S_1	r_m (ГЗ)	r_m (ЦЗ)	P_1	α_1	Δ	D	l
$\alpha = 90^\circ, z_1 = 0.2, \mu = 0.7$										
1	0.8320	1.0840	0.7231	1.1023	1.3371	0.7982	41.8390	1.6575	5.62	4.96
2	0.8410	1.1040	0.7427	1.1220	1.3758	0.8159	42.2753	1.5325	5.91	5.22
3	0.8530	1.1310	0.7691	1.1485	1.4307	0.8395	42.8467	1.3478	5.32	5.58
4	0.8630	1.1540	0.7918	1.1712	1.4805	0.8596	43.3249	1.1717	6.70	5.91
5	0.8910	1.2200	0.8570	1.2363	1.6371	0.9162	44.6273	0.5720	7.93	6.95
6	0.8920	1.2225	0.8596	1.2388	1.6439	0.9185	44.6775	0.5444	7.99	7.00
7	0.8926	1.2239	0.8609	1.2401	1.6473	0.9196	44.7028	0.5307	8.01	7.02
8	0.8930	1.2249	0.8619	1.2411	1.6500	0.9205	44.7228	0.5196	8.04	7.04
9	0.9000	1.2420	0.8790	1.2580	1.6953	0.9351	45.0476	0.3321	8.41	7.34
10	0.9101	1.2668	0.9036	1.2824	1.7635	0.9560	45.5038	0.0414	8.97	7.80
11	0.9114	1.2700	0.9068	1.2856	1.7727	0.9587	45.5630	0.0009	9.05	7.86
12	0.9123	1.2723	0.9091	1.2879	1.7793	0.9606	45.6047	-0.0279	9.10	7.91
13	0.9182	1.2871	0.9239	1.3026	1.8226	0.9731	45.8724	-0.2203	9.47	8.20
$\alpha = 90^\circ, z_1 = 0.2, \mu = 1$										
1	0.8320	1.0840	0.7231	1.1023	1.8542	0.7858	41.8390	1.2110	6.94	6.67
2	0.8410	1.1040	0.7427	1.1220	1.9090	0.8041	42.2753	1.0754	7.37	7.04
3	0.8530	1.1310	0.7691	1.1485	1.9866	0.8285	42.8467	0.8760	7.98	7.56
4	0.8630	1.1540	0.7918	1.1712	2.0571	0.8493	43.3249	0.6872	8.55	8.03
5	0.8910	1.2200	0.8570	1.2363	2.2789	0.9076	44.6273	0.0507	10.39	9.52
6	0.8920	1.2225	0.8596	1.2388	2.2884	0.9099	44.6775	0.0217	10.47	9.58
7	0.8926	1.2239	0.8609	1.2401	2.2933	0.9110	44.7028	0.0072	10.52	9.61
8	0.8929	1.2246	0.8616	1.2408	2.2957	0.9116	44.7151	-0.0001	10.54	9.63
9	0.8930	1.2249	0.8619	1.2411	2.2971	0.9119	44.7228	-0.0046	10.55	9.64
10	0.9000	1.2420	0.8790	1.2580	2.3614	0.9269	45.0476	-0.2018	11.10	10.07

3.2.2 Изучение возможности энергоуглового анализа в спектрометре из последовательно расположенных электростатических гиперболического и цилиндрического зеркал

В работе [142, с. 521] представлена схема спектрографа с энергоугловым разрешением, который обеспечивает высококачественную угловую фокусировку пучков заряженных частиц различных энергий вдоль фокальной поверхности в виде кругообразного конуса. Энергоанализатор состоит из последовательно расположенных электростатического СЗ и ЦЗ с каскадами внутреннего и внешнего отражения пучка заряженных частиц в ЦЗ. В этом случае практически возможна одновременная регистрация энергоугловых распределений частиц посредством позиционно-чувствительного детектора сравнительно простой конической формы, повторяющей поверхность фокусов.

Экспрессный энергоугловой анализ фотоэлектронов возможен только с помощью энергоанализаторов с высокой светосилой. Этому требованию удовлетворяет немногие из известных приборов, к ним относится электростатический электронный спектрометр ESA-22 (рис.34).

Традиционным способом измерения угловых распределений вторичных электронов является механическое вращение анализатора вокруг области взаимодействия. Это усложняет процесс регистрации, увеличивает время сбора информации и вызывает серьезные проблемы с калибровкой прибора.

Угловые спектры позволяют получить дополнительную информацию об исследуемом объекте, например, сведения о зонной структуре приповерхностных слоев, симметрии пространственного распределения электронной плотности и т.д.

Для решения проблемы механического вращения анализатора Институтом Ядерных исследований «АТОМКИ» Академии наук Венгрии (Дебрецен) в сотрудничестве с учеными университета Оулу (Финляндия) был разработан новый электронный спектрометр ESA-22 [160].

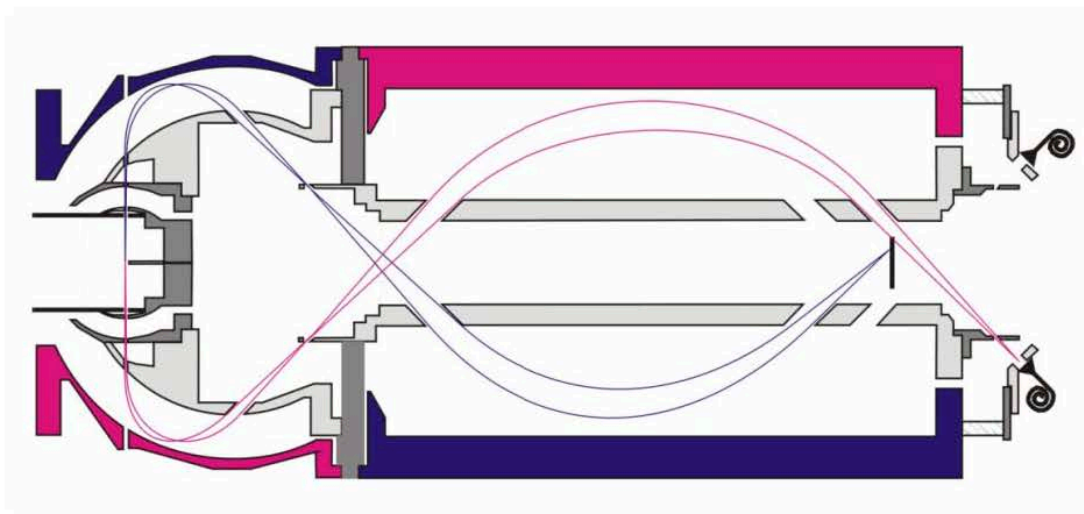


Рисунок 34 – Схема электростатического электронного спектрометра ESA-22

Спектрометр ESA-22 состоит из СЗ и ЦЗ. В спектрометре установлено фокальное кольцо различного диаметра для возможности использовать серию канальных детекторов для регистрации электронов под различными углами или микроканальную пластину для одновременной угловой регистрации электронов. Угол входа частиц в анализатор близок к 90^0 . Спектрометр способен одновременно анализировать два независимых электронных спектра с угловым разрешением (в области $0^0 - 180^0$) в различных интервалах энергий. Относительное энергетическое разрешение составляет $4 \cdot 10^{-3}$ (для щели размером 1,4 мм).

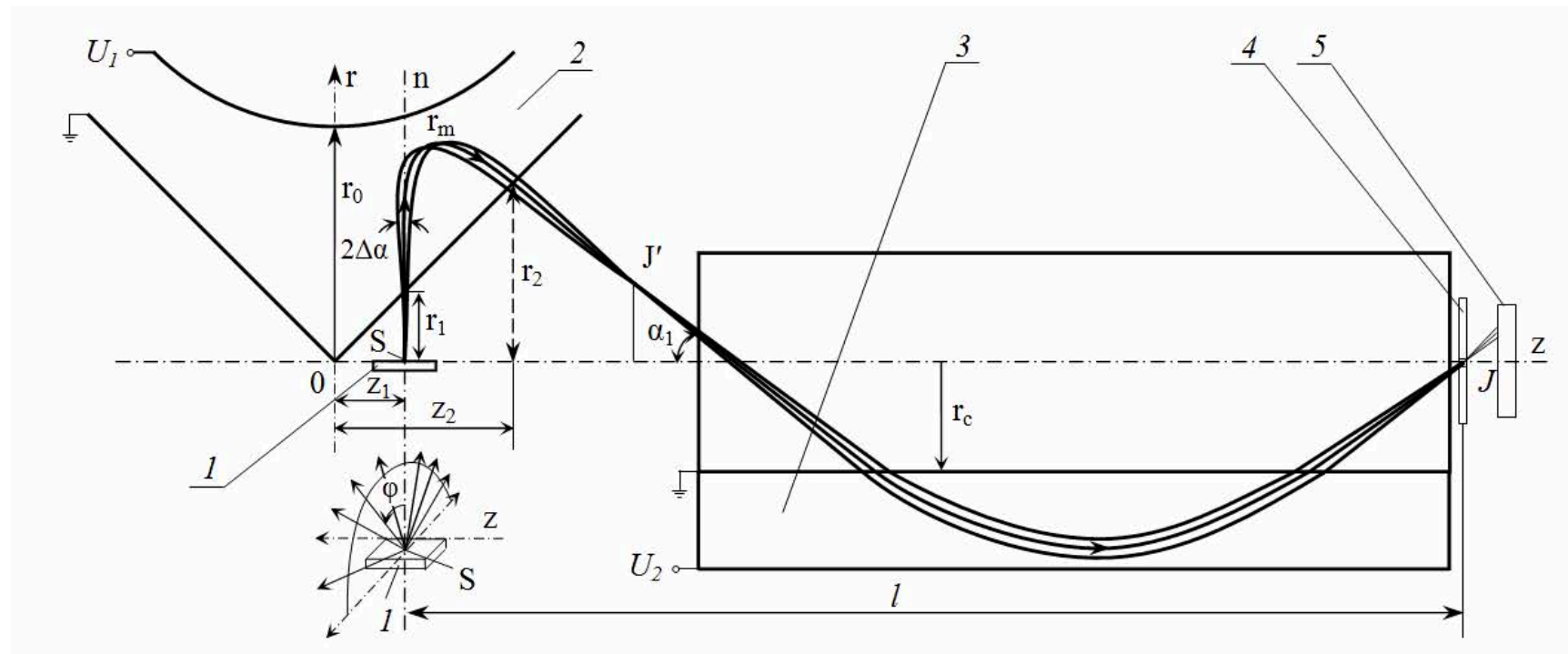
В настоящей работе предложен спектрометр с энергоугловым разрешением на основе ГЗ и ЦЗ, т.е. вместо СЗ используется ГЗ (в отличие от спектрометра ESA-22). Схема электростатического спектрометра с энергоугловым разрешением на основе ГЗ и ЦЗ, приведена на рисунке 35.

Отличительным качеством предложенного зеркального анализатора является свойство анализировать пучки заряженных частиц, выходящих из источника под углами близким к прямому (90^0). Такой угол фокусировки дает возможность построения эффективной диаграммы угловых измерений [161], а фокусировка второго порядка означает выполнение требования сочетания высокой светосилы и разрешающей способности.

Согласно схеме (рис.35), из точечного источника, расположенного на оси симметрии, в спектрометр поступает веерообразный пучок заряженных частиц ($\varphi \leq 90^0$), средняя плоскость которого перпендикулярна оси симметрии, угол раскрытия пучка в средней плоскости составляет 180^0 . ГЗ формирует промежуточное кольцевое изображение источника, которое затем, во втором отражающем каскаде ЦЗ, трансформируется в точечное изображение на оси симметрии.

В спектрометре имеется приемная диафрагма (4) с круговой центральной щелью. При использовании энергоанализаторов в аналитических методах с хорошо сфокусированными потоками первичного излучения эмиттер можно считать точечным. Такое приближение является достаточным для потоков первичных частиц с диаметром сечения порядка или менее 10 мкм при диаметре внутреннего цилиндрического электрода порядка 50 мм.

В работе разрешение анализатора рассчитывалось для оптимального размера выходной диафрагмы в случае точечного эмиттера. В таком, оптимальном случае выходная диафрагма соответствующей ширины располагается в месте наименьшего сечения потока регистрируемых частиц. Оптимальность следует из того, что при уменьшении ширины диафрагмы происходит уменьшение светосилы (входного телесного угла), а при увеличении – светосила не возрастает, а разрешение ухудшается и вершина аппаратной функции анализатора становится плоской, а не острой как в оптимальном случае. Заметим, что имеет смысл сравнивать разные анализаторы именно в режиме их оптимального функционирования.



S – источник пучка заряженных частиц, J – изображение источника, J' – промежуточный фокус, 1 – исследуемый образец с точечным источником, 2 – ГЗ, 3 – ЦЗ, 4 – приемная диафрагма с круговой центральной щелью, 5 – позиционно-чувствительный детектор

Рисунок 35 – Схема спектрометра с энергоугловым разрешением.

В любом интервале энергетического спектра дисперсия ЦЗ регулируется начальным распределением заряженных частиц по углу φ , которое может быть зарегистрировано одновременно с помощью позиционно-чувствительного детектора (5), расположенного позади диафрагмы (4). Преимущество схемы является высокое энергетическое разрешение, полученное благодаря свойствам зеркальной системы с угловой фокусировкой второго порядка. Внизу схемы показан веер траекторий частиц, поступающих в анализатор (см.рис.35).

Относительное энергетическое разрешение комбинированного анализатора составляет $\Delta E/E = 0,28\%$ при угле раскрытия пучка 4° , светосила 3.5 % от 2π . Энергетическое разрешение комбинированного анализатора возрастает с уменьшением угла расходимости входящего пучка и при угле расходимости 2° может быть лучше, чем $0,08\%$.

Продолжим сравнение параметров анализаторов, начатое в работе [162]. Рассчитанные параметры и фокусирующие свойства анализатора приведены в таблице 4 и сравнены с параметрами рассчитанных ранее анализаторов.

Относительная дисперсия по энергии определяется из [162, с. 436]

$$D_r(\alpha = \alpha_0) = -\frac{\Delta l}{l} \frac{n}{\Delta n(1\%)} \quad (47)$$

где $n = qU_1/W_0$ - постоянная спектрометра, $\Delta n(1\%)$ соответствует изменению n при относительном изменении энергии электронов на 1% , прошедших через анализатор.

Таблица 4 - Сравнение параметров различных электростатических анализаторов: классический ЦЗА [163], ЦЗА с искаженным полем [164], ЦЗА с искаженным полем и коническими торцами [162, с.436], трехкаскадный электронный спектрометр ESA-21 [165] и настоящий анализатор. Все рассчитанные значения связаны с фокусировкой второго порядка.

Номер версии	α_0	l	n	D_r
[163]	42.3°	6.129	0.529	0.914
[164]	43.5°	5.707	0.581	1.202
[162]	90°	11.59	0.905	1.505
[165]	90°	17.016	0.590	0.983
Настоящая работа	90°	7.86	1.24	1.15

Из таблицы 4 видно, что для угла входа 90° предложенный в настоящей работе анализатор имеет наименьшую длину, не уступая в дисперсии.

Таким образом, определено уравнение полной проекции траектории движения заряженных частиц в комбинированной системе последовательно расположенных гиперболического и цилиндрического электростатических зеркал. Для данной системы выполнен расчет абберрационных коэффициентов и рассчитано множество различных схем угловой фокусировки второго порядка в

аксиальной плоскости анализатора. Для этих схем проведен анализ полученных электронно-оптических характеристик [166].

Определены электронно-оптические параметры наиболее оптимальной схемы комбинированного энергоанализатора. Он способен работать в режиме высокой разрешающей способности и высокой светосилы. Такое сочетание с возможностью анализировать пучки заряженных частиц, выходящих из источника под углами близкими 90^0 , позволяет использовать эту схему в качестве спектрометра с энергоугловым разрешением.

Предложенная электронно-оптическая схема может быть ориентирована на организацию режима двойного спектрографа – по энергии и по углу.

4 КОРПУСКУЛЯРНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРОВ С ГЕКСАПОЛЬНО-ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ $U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z)$

Класс осесимметричных Лапласовых полей, построенных на основе сложения мультиполей с электростатическим полем цилиндрического типа, был предложен в работах [81,82].

Исследование электронно-оптических свойств такого класса синтезированных мультипольно-цилиндрических полей представляет практический интерес для реализации новых систем энергоанализа потоков заряженных частиц. Основная трудность при разработке таких энергоанализирующих систем связана с проблемой аналитического описания траекторий заряженных частиц. Решение этой проблемы необходимо для оценки aberrаций, определяющих максимальное разрешение электронно-оптической системы.

В работе [88, с.195] был разработан приближенно-аналитический метод расчета траекторий для определения корпускулярно-оптических параметров при расчете схем зеркальных анализаторов на основе осесимметричного мультипольно-цилиндрического поля. Используя предложенную математическую модель, представим траекторный расчет движения заряженных частиц в гексапольно-цилиндрическом поле (ГЦП). Потенциал ГЦП имеет следующий вид [167]

$$U(r, z) = \mu \ln r + \gamma U_h(r, z), \quad (48)$$

где

$$U_h(r, z) = \frac{1}{2} \left\{ Lnr \left[z^2 - \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{2} \right\} \quad (49)$$

- круговой гексаполь, μ - коэффициент, задающий весовой вклад цилиндрического поля $\ln r$, γ - весовая составляющая кругового гексаполя.

Цель данного раздела заключается в рассмотрении ГЦП (48) для различных коэффициентов μ и γ , то есть для различных вкладов цилиндрического поля и кругового гексаполя не рассмотренных ранее, в необходимости рассчитать и провести моделирования электронно-оптических схем.

4.1 Расчет и моделирование электронно-оптической схемы гексапольно-цилиндрического энергоанализатора при $\mu = 1, \gamma = 1$

В данном подразделе представлен расчет электронно-оптических характеристик для ранее не исследованного случая движения заряженной частицы в поле, потенциал которого в системе координат r, z описывается следующим выражением:

начало координат x, ξ (см. рисунок 36). Все линейные размеры при расчетах будут выражены в долях радиуса внутреннего цилиндрического электрода r_0

$$\frac{r}{r_0} = \frac{r_0 + r_0 \rho}{r_0} = 1 + \rho, \quad x = \frac{r_m - r}{r_0} = \rho_m - \rho, \quad \xi = \frac{z}{r_0}. \quad (51)$$

Распределение потенциала в поле (50) в новой системе координат x, ξ будет иметь следующий вид:

$$U(x, \xi) = U_0 g(x, \xi), \quad (52)$$

где

$$g(x, \xi) = \ln(R - x) \left[\frac{1}{2} \xi^2 - \frac{1}{4} (R - x)^2 \right] + \frac{3}{4} + \frac{1}{4} (R - x)^2 - \frac{1}{4}, \quad R = 1 + \rho_m. \quad (53)$$

Движение заряженной частицы в поле (53) описывается следующей системой уравнений

$$m \frac{dx}{dt} = q U_0 \varepsilon_1, \quad \varepsilon_1 = - \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial x}, \quad (54)$$

$$m \frac{d\xi}{dt} = q U_0 \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 = - \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi}. \quad (55)$$

Интегрирование суммы уравнений (54) и (55) вдоль траектории частицы в пределах от вершины m до произвольной точки, приводит к закону сохранения энергии для движущейся в электростатическом поле частицы. Это выражение связывает изменение кинетической энергии частицы с пройденной разностью потенциалов

$$\frac{m v_m^2}{2} - \frac{m}{2} (\mathcal{E} + \xi^2) = -q (U_m - U) = -q U_0 (g_0 - g_x). \quad (56)$$

Здесь $U_m = U_0 g(x_m, \xi_m) = U_0 g_0$ - потенциал поля в точке m , где $x_m = \xi_m = 0$, $g_x = g(x, \xi(x))$.

Величину $\frac{m \mathcal{E}}{2}$ определим интегрированием второго уравнения (55) в пределах от m до произвольной точки траектории частиц. При этом учтем, что $v_m^2 = \xi_m^2 + \mathcal{E}_m^2 = \xi_m^2$, так как в вершине траектории $\mathcal{E}_m = 0$.

Используя соотношение $\xi = \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{dx} \frac{dx}{dt} = \xi' \mathcal{E}$, получим

$$\frac{m v_m^2}{2} - \frac{m \xi^2}{2} = q U_0 \int_x^{x_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} dx = q U_0 \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' d\xi. \quad (57)$$

Согласно рисунку 36 $\frac{m \xi^2}{2} = W \cos^2 \alpha_0$ при $x = \rho_m$, поэтому уравнение (57) можно переписать относительно $\frac{m v_m^2}{2}$ следующим образом

$$\frac{m v_m^2}{2} = W \cos^2 \alpha + q U_0 f_m, \quad f_m = \int_0^{\rho_m} \frac{\partial g(x, \xi)}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dx} dx = \int_0^{\rho_m} \ln(R-x) \xi \xi' d\xi. \quad (58)$$

Далее подставив выражения (57), (58) в (56), получаем интегро-дифференциальное уравнение движения заряженной частицы в ГЦП (53)

$$(\xi')^2 \left[g_0 - g_x + \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' dx \right] = P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + f_m - \int_0^x \ln(R-x) \xi \xi' dx, \quad (59)$$

где

$$g_0 = g(x_m, \xi_m) = \ln R \left[\frac{R^2}{4} + \frac{3}{4} \right] - \frac{R^2}{4} + \frac{1}{4} \quad (60)$$

и $P_0^2 = \frac{W}{qU} \sin^2 \alpha_0$ - параметр отражения ГЦП, связывающий его геометрические и энергетические параметры.

С целью решения интегро-дифференциального уравнения (59) нами использован метод разложения в степенной ряд. Искомая функция $(\xi')^2$ в интегро-дифференциальном уравнении (59) имеет в особой точке $x = 0$ разрыв, в этом случае сомножитель $(\xi')^2$ обращается в нуль. Искомую функцию невозможно представить в виде обычного степенного ряда, поэтому решение уравнения ищется в виде обобщенного ряда $\xi = x^\rho \sum_{n=0}^{\infty} C_n x^n$. Определено

значение параметра $\rho = \frac{1}{2}$ из предварительного разложения уравнения (59) в обобщенный ряд. Таким образом, решение уравнения нужно искать в виде следующего дробно-степенного ряда

$$\xi = \sqrt{x} (C_0 + C_1 x + C_2 x^2 + C_3 x^3 + C_4 x^4 + C_5 x^5 + C_6 x^6 + \dots). \quad (61)$$

Ниже представлены коэффициенты C_n , рассчитанные при подстановке в уравнение (59) дробно-степенного ряда (61):

$$C_0^2 = 4 \frac{P^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - f_m}{\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{4} \left(R + \frac{3}{R} - 2R \ln R \right) \quad (62)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{\gamma} \left[-\frac{C_0^2}{24R} - \frac{3}{8} \ln R - \frac{11}{16R^2} - \frac{1}{48} \right], \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_2}{C_0} = & -\frac{9}{10} \frac{C_1^2}{C_0^2} + \frac{1}{\gamma} \times \left[\frac{C_1}{C_0} \left(-\frac{11}{60} \frac{C_0^2}{R} - \frac{11}{20} \ln R - \frac{9}{40R^2} - \frac{3}{40} \right) - \right. \\ & \left. -\frac{1}{60} \frac{C_0^2}{R^2} - \frac{1}{40R^3} + \frac{13}{120R} \right] \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \frac{C_3}{C_0} = & -\frac{15}{7} \frac{C_1 C_2}{C_0^2} + \frac{1}{\gamma} \left[\frac{C_2}{C_0} \left(-\frac{11}{56} \frac{C_0^2}{R} - \frac{13}{28} \ln R - \frac{15}{56R^2} - \frac{5}{56} \right) + \right. \\ & + \frac{C_1^2}{C_0^2} \left(-\frac{5}{16} \frac{C_0^2}{R} - \frac{17}{56} \ln R - \frac{27}{112R^2} - \frac{9}{112} \right) + \\ & \left. + \frac{C_1}{C_0} \left(-\frac{5}{56} \frac{C_0^2}{R} - \frac{3}{28R^3} + \frac{19}{84R} \right) - \frac{C_0^2}{112R^3} - \frac{3}{224R^4} + \frac{17}{672R^2} \right] \end{aligned} \quad (65)$$

Далее были рассчитаны коэффициенты включительно до 6 порядка по величине x .

Из уравнений (62)-(65) видно, что все коэффициенты C_n необходимые для расчета функции $\xi = \sqrt{x} \sum_{g=0}^{\infty} C_n x^n$, зависят от радиальной R координаты точки поворота траектории. Эту составляющую можно найти из интегро-дифференциального уравнения (59) при условии, что $x = \rho_m$.

В этом случае $(\xi')^2 = \operatorname{ctg}^2 \alpha_0$, $g_{x=\rho_m} = 0$ и

$$g_0 + f_m = P^2. \quad (66)$$

Подставив g_0 из уравнения (60) в (66), придем к трансцендентному уравнению

$$\ln R = \frac{4(P^2 - f_m) - R^2 + 1}{3 - R^2}. \quad (67)$$

Величина R из выражения (67) определяется методом последовательных приближений. В качестве нулевого приближения используются параметры ЦЗА [152, с.133]

$$R_0 = \exp P^2 = 1 + P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \frac{1}{6}P^6 + \frac{1}{24}P^8 + \dots \quad \text{и} \quad f_{m_0} = 0$$

Последовательность расчета методом последовательных приближений будет следующей [168, с.132]:

- С помощью нулевого приближения определяем коэффициенты C_n .
- Из выражения (67) находим радиальную координату точки поворота траектории R_1 в первом приближении.
- Определяем коэффициенты C_n и f_m в первом приближении.
- С помощью данных первого приближения определяем величину R_2 во втором приближении и так далее.

Ниже приведены результаты расчета траектории частиц в ГЦП. Все расчеты получены в виде разложения в ряд по величине P с точностью до 14 порядка включительно:

$$\begin{aligned} \rho_m = & P^2 + \frac{1}{2}P^4 + \left[-\operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{1}{3} \right] P^6 + \left[-\frac{23}{9} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{3}{8} \right] P^8 + \\ & + \left[\frac{20}{9} \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 - \frac{313}{60} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{53}{120} \right] P^{10} + \\ & + \left[\frac{1007}{90} \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 - \frac{67631}{6300} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{79}{144} \right] P^{12} + \dots \end{aligned} \quad (68)$$

ξ_m - проекция траектории на ось симметрии зеркала от точки входа частицы в поле до точки m поворота траектории определяется выражением (61) при условии $x = \rho_m$

$$\xi_m = \xi(x)|_{x=\rho_m} = \sqrt{\rho_m} C_0 S, \quad (69)$$

где

$$C_0 = \operatorname{ctg} \alpha_0 \sqrt{4P^2 + 4P^4 + 8P^6 + \left(-4\operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{146}{9} \right) P^8 + \left(-\frac{208}{9} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{297}{10} \right) P^{10} + \left(\frac{80}{9} \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 - \frac{3953}{45} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 + \frac{176737}{3150} \right) P^{12} + \dots}, \quad (70)$$

$$\begin{aligned}
S &= \left(1 + \frac{C_1}{C_0} \rho_m + \frac{C_2}{C_0} \rho_m^2 + \frac{C_3}{C_0} \rho_m^3 + \frac{C_4}{C_0} \rho_m^4 + \frac{C_5}{C_0} \rho_m^5 + \frac{C_6}{C_0} \rho_m^6\right) = \\
&= 1 - \frac{1}{12} P^2 + \left(-\frac{1}{6} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - \frac{131}{480}\right) P^4 + \left(-\frac{53}{360} \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - \frac{17573}{40320}\right) P^6 + \\
&+ (0,26389 \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 + 0,34595 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - 0,50249) P^8 + \\
&+ (0,81703 \operatorname{ctg}^4 \alpha_0 + 1,83040 \operatorname{ctg}^2 \alpha_0 - 0,70059) P^{10} + \dots
\end{aligned} \tag{71}$$

Полная проекция траектории на ось симметрии от источника А до его изображения В есть сумма:

$$l = \frac{l}{r_0} = \Delta \operatorname{ctg} \alpha_0 + 2\xi_m, \quad \Delta = \Delta_1 + \Delta_2, \tag{72}$$

где Δ_1 и Δ_2 - удаленность источника и его изображения от поверхности внутреннего цилиндрического электрода (см. рисунок 36).

Таким образом, определив выражение для траекторий заряженных частиц в ГЦП, можно рассчитать все необходимые электронно-оптические характеристики анализатора.

Для анализа параметров электростатического ГЦП - анализатора рассчитаны коэффициенты пространственной фокусировки первого, второго и третьего порядков: $A_I = \frac{dl}{d\alpha}$, $A_{II} = \frac{1}{2!} \frac{d^2 l}{d\alpha^2}$, $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3}$. Найдены условия угловой фокусировки второго порядка: $\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2 l}{d\alpha^2} = 0$.

В таблице 5 приведены рассчитанные основные электронно-оптические параметры ГЦП-анализатора в зависимости от параметра отражения зеркала $P = \sqrt{mV_0^2/2qU_0} \sin \alpha_0$ (m , V_0 и q - масса, скорость и заряд анализируемых частиц) и угла входа траектории α_0 при условии угловой фокусировки второго порядка. Это следующие параметры: $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ (рисунок 36); ρ_m - координата точки поворота траектории в поле; ξ_m - половинная проекция траектории на ось симметрии в поле зеркала; l - фокусное расстояние, равное полной проекции траектории на ось симметрии зеркала от источника до его изображения, удовлетворяющее условиям фокусировки; $D = \frac{\partial l}{\partial \varepsilon}$ - относительная линейная

дисперсия по энергии, определяемая дифференцированием полной проекции траектории на ось симметрии от источника до его изображения по величине энергетического разброса в пучке частиц $\varepsilon = \frac{\Delta \omega}{\omega}$; $A_{III} = \frac{1}{3!} \frac{d^3 l}{d\alpha^3}$ - коэффициент кубической угловой аберрации.

Таблица 5 - Электронно-оптические параметры ГЦП – анализатора при $\mu = 1$, $\gamma = 1$

P	α_0 (град.)	ρ_m	Δ	ξ_m	l	D	A_{III}
0,1	30,3300	0,0100	0,0101	0,0344	0,1032	0,0693	-0,3114
0,12	30,4780	0,0145	0,0145	0,0494	0,1481	0,0997	-0,4426
0,14	30,6510	0,0198	0,0198	0,0670	0,2009	0,1356	-0,5932
0,16	30,8520	0,0259	0,0260	0,0871	0,2611	0,1769	-0,7604
0,18	31,0790	0,0328	0,0330	0,1097	0,3287	0,2235	-0,9417
0,2	31,3342	0,0406	0,0408	0,1347	0,4033	0,2752	-1,1334
0,22	31,6161	0,0493	0,0495	0,1619	0,4845	0,3320	-1,3320
0,24	31,9253	0,0588	0,0590	0,1913	0,5720	0,3936	-1,5331
0,26	32,2613	0,0691	0,0694	0,2227	0,6651	0,4596	-1,7324
0,28	32,6238	0,0803	0,0805	0,2560	0,7636	0,5298	-1,9254
0,3	33,0120	0,0922	0,0924	0,2911	0,8667	0,6037	-2,1075
0,32	33,4251	0,1050	0,1050	0,3278	0,9740	0,6809	-2,2744
0,34	33,8615	0,1185	0,1184	0,3660	1,0848	0,7609	-2,4222
0,36	34,3192	0,1328	0,1323	0,4055	1,1987	0,8431	-2,5475
0,38	34,7954	0,1477	0,1468	0,4463	1,3151	0,9272	-2,6471
0,4	35,2868	0,1633	0,1618	0,4882	1,4337	1,0125	-2,7177
0,42	35,7893	0,1795	0,1773	0,5311	1,5541	1,0987	-2,7551
0,44	36,2988	0,1963	0,1932	0,5750	1,6761	1,1852	-2,7533
0,46	36,8114	0,2136	0,2094	0,6199	1,7994	1,2720	-2,7026
0,48	37,3254	0,2312	0,2259	0,6656	1,9237	1,3588	-2,5876
0,5	37,8455	0,2493	0,2425	0,7120	2,0482	1,4457	-2,3843
0,52	38,3918	0,2679	0,2588	0,7586	2,1704	1,5330	-2,0545
0,54	39,0245	0,2869	0,2741	0,8038	2,2841	1,6199	-1,5385
0,56	39,9046	0,3066	0,2861	0,8439	2,3721	1,7016	-0,7604
0,5754	40,9766	0,3225	0,2899	0,8657	2,3991	1,7516	0,0000
0,58	41,3980	0,3274	0,2896	0,8698	2,3965	1,7626	0,2201
0,6	43,7420	0,3498	0,2811	0,8763	2,3401	1,7967	0,7340
0,62	46,0910	0,3722	0,2736	0,8840	2,2948	1,8435	0,2135
0,6242	46,5065	0,3766	0,2734	0,8873	2,2934	1,8568	0,0000
0,64	47,8170	0,3922	0,2779	0,9063	2,3162	1,9178	-1,0781
0,66	48,7420	0,4071	0,2978	0,9468	2,4161	2,0175	-3,0426
0,68	47,9590	0,4121	0,3473	1,0273	2,6809	2,2024	-6,9744
0,7	45,0826	0,4263	0,4703	1,1806	3,2990	2,9194	-26,4767
0,7045	44,8600	0,4321	0,5000	1,2080	3,4207	3,1015	-33,1633
0,72	44,4548	0,4543	0,6199	1,2991	3,8617	3,7915	-65,2819

Анализ данных таблицы 5 показывает, что в предложенном зеркальном ГЦП энергоанализаторе в широком интервале значений параметров отражения P и входного угла α_0 осуществляется режим угловой фокусировки второго порядка. При этом источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода, т.е. условие угловой фокусировки реализуется только для схем фокусировки заряженных частиц из кольцевого источника в кольцевой детектор ($\Delta_1 + \Delta_2 < 1$).

Единственная схема ГЦП анализатора, фокусирующего по схеме «кольцо-ось» с параметрами $P=0.7045$, $\alpha_0=44,8600$, $\Delta_1 + \Delta_2 = 1$, не представляет практического интереса. Для нее коэффициент кубической угловой аберрации, соответствующий аберрации прибора, довольно велик $A_{III} \sim 33.16$ [169].

Наиболее оптимальные по электронно-оптическим параметрам зеркальные анализаторы с ГЦП реализуются в области значений $0,52 \leq P \leq 0,64$, для которых аберрационные коэффициенты третьего порядка невелики.

Определены две схемы с параметрами $P = 0,5754$, $\alpha_0 = 40,9766$ и $P = 0,6242$, $\alpha_0 = 46,5065$, обеспечивающие режим угловой фокусировки

третьего порядка $\frac{dl}{d\alpha} = \frac{d^2l}{d\alpha^2} = \frac{d^3l}{d\alpha^3} = 0$. Однако наибольший интерес представляет

электронно-оптическая схема гексапольно-цилиндрического анализатора, соответствующая следующим параметрам: $P = 0,6$, $\alpha_0 = 43,7420$, $D = 1,7967$, $A_{III} = 0,7340$. Кубическая аберрация A_{III} в этой схеме не равна нулю, но она мала и в тоже время имеет максимальную величину в области значений параметра отражения $0,52 \leq P \leq 0,64$. Это значит, что коэффициент пространственной аберрации следующего порядка A_{IV} в этой точке равен нулю. Это позволяет сделать вывод о том, что угловая фокусировка анализатора близка к идеальной [170, 171].

Угол входа осевой траектории в поле зеркала равен $\alpha_0 = 43,7420$, начальный угловой разброс для боковых ветвей траектории составляет 16° ($\Delta\alpha = 8^\circ$).

Размытие изображения в фокусе зеркального энергоанализатора, вызванное угловой расходимостью пучка в аксиальной плоскости в 16° , определяется кубической угловой аберрацией $\Delta l = A_{III}(\Delta\alpha)^3$ [172] и равно $\Delta l = 0,004$. Это значит, что энергоанализатор с ГЦП способен обеспечить острую фокусировку заряженных частиц с большим угловым разбросом в аксиальной плоскости. Для сравнения, ширина линии изображения пучка частиц с таким же угловым разбросом в ЦЗА примерно в 20 раз больше и равна $\Delta l = 0,084$.

Если кольцевые щели i' и i'' узкие, а угловая расходимость пучка велика, то мерой разрешающей способности анализатора может служить величина

удельной дисперсии по энергии. Она равна отношению линейной дисперсии по энергии к ширине линии изображения в фокусе зеркала

$$\delta = \frac{D}{\Delta I} = \frac{D}{A_{III} (\Delta \alpha)^3} \quad (73)$$

Величина удельной дисперсии по энергии ГЦП анализатора для частиц с начальным угловым разбросом в 16° равна $\delta = 449,68$. Это примерно в 7 раз превышает удельную дисперсию ЦЗА.

В следующей части работы для подтверждения результатов расчетов с помощью приближенно-аналитического метода проведено моделирование электронно-оптической схемы энергоанализатора на основе ГЦП при $\mu=1$, $\gamma=1$. На рисунке 37 изображено распределение электрического поля в ГЦП-анализаторе при $\mu=1$, $\gamma=1$. На рисунке 38 приведено трехмерное изображение сечения электростатического поля.

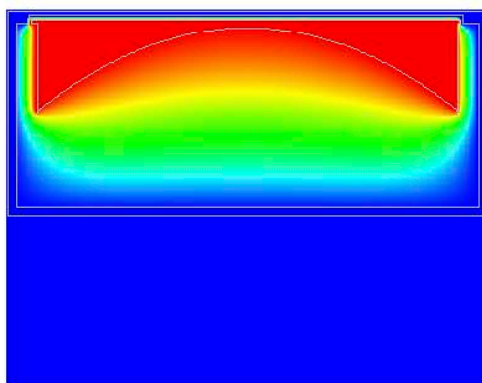


Рисунок 37 - Распределение поля в ГЦП-анализаторе при $\mu = 1$, $\gamma = 1$

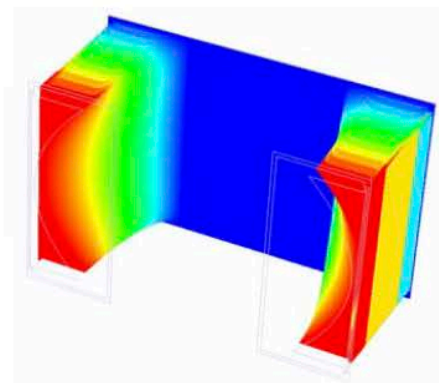
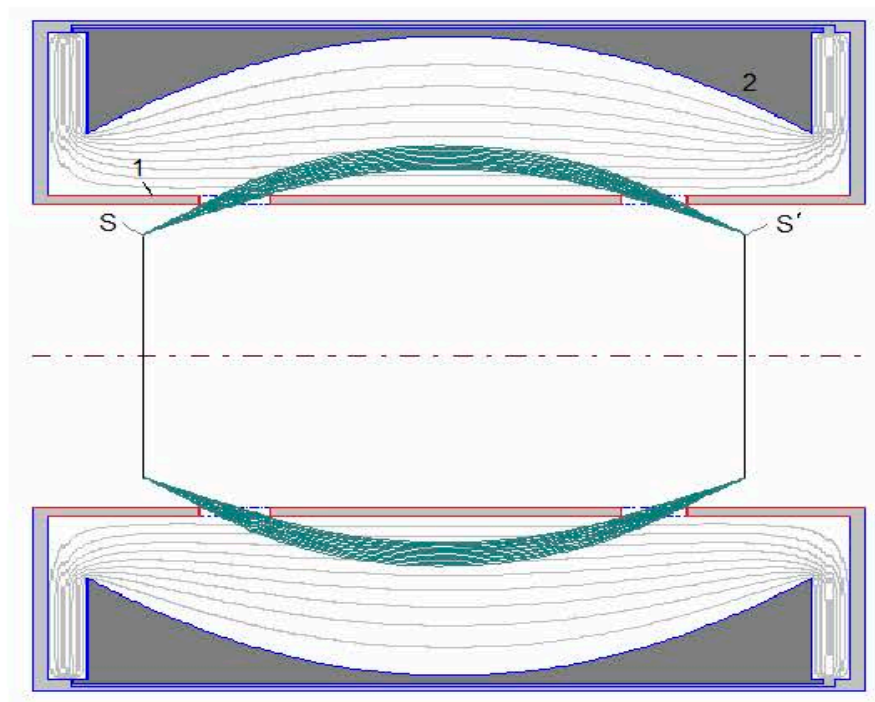


Рисунок 38 - Трехмерное изображение сечения ГЦП

Рисунок 39 представляет ход траекторий заряженных частиц в предложенной электронно-оптической схеме. Общая протяженность электронно-оптической системы – 11,4. Потенциал внешнего электрода (2) с криволинейным профилем равен 1. Радиус внутреннего цилиндрического электрода (1) равен 4,2. Внутренний цилиндрический электрод под нулевым потенциалом. Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода $E/V=1$. Положение источника – $x = 1,6$; $y = 3,2$. Шаг изменения начального угла вылета частиц 1° . Все размеры выражены в условных единицах.

Согласно рисунку 39, из тонкого кольцевого электронно-оптического источника S в интервале полярных углов от 31° до 44° вылетают частицы и под действием потенциала на внешнем электроде с криволинейным профилем (2) отклоняются от ГЦП, и далее фокусируются в кольцевое изображение S' . Кольцевой источник S и его изображение S' находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Таким образом, в системе выполняется угловая фокусировка типа «кольцо-кольцо».



1 – цилиндрический электрод, 2 – внешний отклоняющий электрод с криволинейным профилем, S – кольцевой источник, S' – кольцевое изображение

Рисунок 39 - Траектории движения частиц в ГЦП-анализаторе при $\mu = 1$, $\gamma = 1$

В таблице 6 представлены результаты численного расчета фокусирующих свойств ГЦП при $\mu=1$ и $\gamma=1$ в режиме фокусировки «кольцо-кольцо». Из расчетов фокусирующих свойств установлено, что в данной электронно-оптической схеме для широкого интервала изменения входных углов ($31-44^\circ$) реализуется режим угловой фокусировки второго порядка с центральным углом $35,7^\circ$. Для данной системы определены две схемы, обеспечивающие режим угловой фокусировки третьего порядка. В интервале входных углов $39-42^\circ$ с центральным углом фокусировки, равным $40,95^\circ$, и в интервале входных углов $45-48^\circ$ с центральным углом фокусировки - $46,55^\circ$ [173].

Таблица 6 - Фокусирующие свойства ГЦП при $\mu=1$ и $\gamma=1$

Порядок фокусировки	2
Центральный угол фокусировки	$35,7^\circ$
X_{foc} координата точки фокуса	8,9
Y_{foc} координата точки фокуса	3,2
Параметр отражения	1

Для расчета аппаратной функции ГЦП-анализатора запускаются частицы из кольцевого источника в диапазоне начальных углов $31-44^\circ$ и в диапазоне

начальных энергий 0,99—1,01. На рисунке 40 представлена аппаратная функция ГЦП-анализатора при $\mu=1$ и $\gamma=1$ в режиме угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо».

Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции ГЦП - анализатора с радиусом выходной диафрагмы $0,012R_{\text{эн}}$ составляет 1,1 % при светосиле $\Omega/2\pi=10$ %. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с данными расчетов приближенного – аналитическим методом.

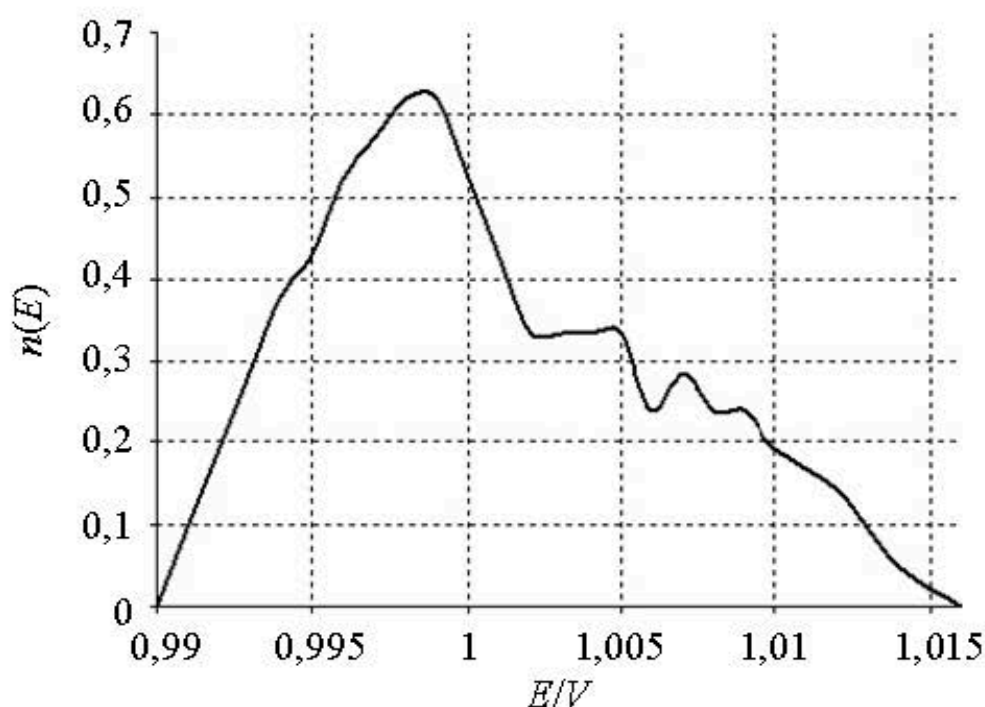


Рисунок 40 - Аппаратная функция ГЦП-анализатора при $\mu = 1$, $\gamma = 1$

Таким образом, рассчитаны электронно-оптические параметры зеркального энергоанализатора на основе электростатического ГЦП при $\mu = 1$, $\gamma = 1$. Определены условия угловой фокусировки для траекторий частиц со значительной угловой расходимостью пучка в аксиальной плоскости. Установлено, что на основе ГЦП могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой второго и третьего порядков, если источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Определены электронно-оптические параметры гексапольно-цилиндрического зеркального анализатора с угловой фокусировкой близкой к идеальной, обеспечивающей режим работы в условиях высокой разрешающей способности и большой светосилы. Получена численная модель ГЦП – анализатора, рассчитана аппаратная функция прибора [174].

Данная схема с кольцевым электронно-оптическим изображением может быть использована в качестве системы, где требуется свободная от анализируемых частиц область вблизи оси, например в оже-спектрометрах.

4.2 Численное моделирование длиннофокусного энергоанализатора на основе гексапольно-цилиндрического поля с организацией защиты рабочего объема от влияния краевых полей

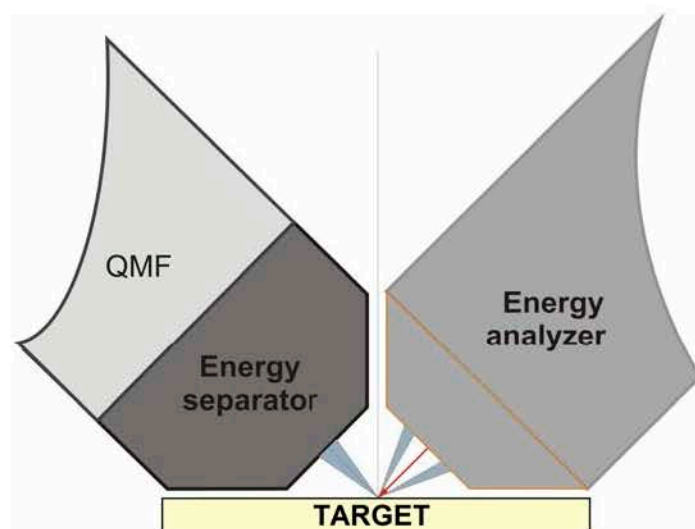
Данный подраздел посвящен разработке длиннофокусной системы для локального исследования материалов и структур методом электронной оже-спектроскопии. Актуальность разработки заключена в реально возникшей потребности на рынке физико-аналитического оборудования, нацеленного на применение в вакуумных технологиях производства приборов микро- и нанoeлектроники, в средствах профильного высоколокального оже-анализа поверхности. Оже-микрозонд предназначен для использования в качестве метрологической системы сверхвысоковакуумных технологических процессов, например, роста пленок, молекулярно-лучевой эпитаксии, ионной имплантации, плазменной обработки и т.д., являющихся на данный момент наиболее передовыми и эффективными при производстве новых материалов и структур, микро- и нано-объектов.

Основные требования к встраиваемому в технологические процессы диагностическому оборудованию - 1) относительное энергетическое разрешение анализатора не хуже 0.5 % и 2) диаметр пучка возбуждающих электронов порядка 1 мкм. Дополнительные требования к оже-микрозонду – малые габариты (фланец типа конфлат CF 100) и невысокая стоимость, на несколько порядков ниже стоимости основного технологического оборудования [175].

Вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) позиционируется в диагностике поверхности как существенно разрушающий метод и поэтому имеет ограниченное применение в качестве встраиваемой в технологии методики. Однако на практике возникают ситуации, в которых методы электронной спектроскопии бесполезны, а вторично-ионная масс-спектрометрия не имеет альтернативы вследствие высокого уровня обеспечиваемой ей чувствительности. Наиболее просто акцентируемая проблема разрешается пространственным совмещением методов: 1) электронной оже-спектроскопии (ЭОС) как основного метода и 2) ВИМС как дополнительного метода и используемого в критических ситуациях. Для пространственного совмещения методов нужны средства с большими расстояниями «образец-анализатор». Решение задачи пространственного совмещения средств обеспечения ЭОС и ВИМС (см. рисунок 41) с учетом требований к габаритам возможно лишь в определенной их геометрии. В таблице 7 представлено сравнение характеристик методов ЭОС и ВИМС.

Из таблицы 7 видно, что чувствительность у ВИМС в 100-1000 раз превышает, чем у ЭОС. При разрешении (1 - 10) мкм чувствительность метода ВИМС составляет около 10–4% ат., что соответствует концентрации 10^{16} см^{-3} . И поэтому для исследования совсем малых концентраций пригодна только ВИМС. К недостаткам ВИМС относится то, что метод является разрушающим, в отличие от ЭОС. Поэтому ВИМС выступает в роли дополнительного метода. Объединяя метод ЭОС с ВИМС, осуществляется возможность совмещения хорошего

разрешения по глубине твердого тела первого метода с аналитическими возможностями второго метода. Таким образом, совмещение данных методов обеспечивает проведение высокочувствительного анализа поверхности исследуемого образца.



Energy separator – сепаратор энергий ионов, QMF – квадрупольный фильтр масс, Energy analyzer – энергоанализатор электронов со встроенной электронной пушкой, Target – исследуемый образец (мишень)

Рисунок 41 - Пространственное совмещение методов ВИМС и ЭОС

Примечание – использовано из источника [175]

Таблица 7 – Сравнение характеристик методов ЭОС и ВИМС

Метод	Разрешение в плоскости, мкм	Разрешен ие по глубине, нм	Чувствитель ность, см ⁻³	Достоинства и недостатки метода
ЭОС	$1 - 10^2$	0,6 - 5	$10^{17} - 10^{20}$	Неразрушающий; позволяет определить трехмерный профиль концентраций; полуколичественный
ВИМС	$1 - 10^2$	1,5 - 5	$10^{13} - 10^{19}$	Разрушающий; позволяет определить профиль по глубине; полуколичественный

Основное ограничение здесь следующее – расстояние от образца до края анализатора (и сепаратора), которое условно можно назвать фокусным расстоянием, не должно быть меньше 20 мм при внешнем диаметре анализатора и сепаратора 80 мм, что позволяет разместить каждое из устройств на фланце типа конфлат CF 100. Поскольку фокус анализатора и коаксиально встроенной в него электронной пушки при проведении экспериментов совмещаются на

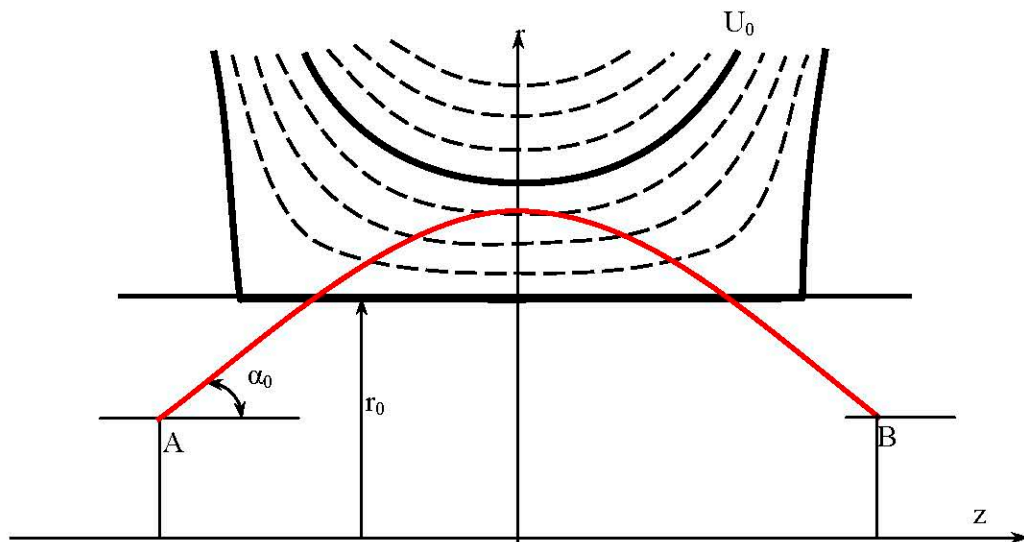
поверхности образца, то пушка также предполагается длиннофокусной [175, с.54].

Классический зеркальный цилиндрический анализатор (ЦЗА) [152] принципиально не может обеспечить длинный фокус.

В последние десятилетия было предложено несколько новых конструкций аксиально-симметричных энергоанализаторов, альтернативных ЦЗА.

Квазиконический энергоанализатор [151], несмотря на ряд его несомненных преимуществ (на порядок лучше энергетическое разрешение, чем у ЦЗА) имеет совсем малое расстояние «образец-анализатор». В технологических установках его применение ограничено. Разрешить данную проблему возможно на базе электростатических гексапольно-цилиндрических полей.

Аксиально-симметричное электростатическое зеркально поле в ГЦП – анализаторе является суперпозицией цилиндрического поля и гексаполя. Электронно-оптическая схема гексапольно-цилиндрического энергоанализатора представлена на рисунке 42. Продольные габариты предложенного энергоанализатора на основе ГЦП ограничены торцевыми электродами, что обеспечивает организацию защиты от краевых полей.



А - источник, В - приемник

Рисунок 42 - Схема зеркального ГЦП – анализатора с торцевыми электродами при $\mu = 1$, $\gamma = -1$

Примечание – использовано из источника [176]

Потенциал в ГЦП описывается в системе координат r, z следующим выражением

$$U(r, z) = \ln r - U_h(r, z). \quad (74)$$

В работах [168, 176] приближенно-аналитическим методом исследованы схемы ГЦП-анализатора с торцевыми электродами при $\mu = 1$ и $\gamma = -1$, где

реализуется угловая фокусировка второго порядка типа "кольцо-ось" и "ось-ось". Рассмотренные типы фокусировок не обеспечивают длинный фокус.

Согласно рисунку 42, анализатор состоит из цилиндрического и двух торцевых электродов, а также аксиально-симметричного внешнего отклоняющего электрода, образующая которого совпадает с одной из эквипотенциалей поля. Цилиндрический и торцевые электроды под нулевым потенциалом, внешний электрод под потенциалом U_0 .

Проведено моделирование ГЦП - анализатора с защитой от краевых полей с целью поиска схемы с угловой фокусировкой типа «ось-кольцо», обеспечивающей большое фокусное расстояние от исследуемого образца (мишени) до анализатора. Моделирование проводилось с помощью численной программы «Фокус» моделирования аксиально-осесимметричных электронно-оптических систем.

Функция распределения поля в ГЦП - анализаторе приведена на рисунке 43. На рисунке 44 показано трехмерное изображение картины электростатического поля сечения электронно-оптической схемы зеркального ГЦП-анализатора.

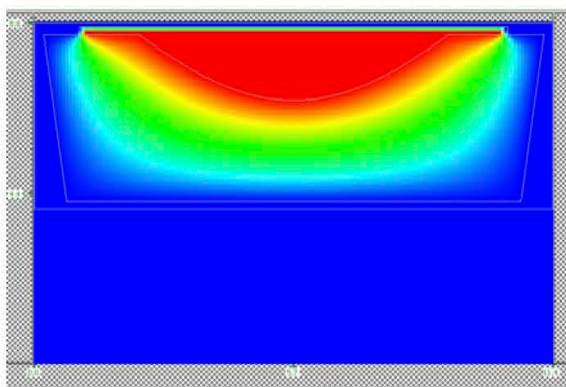


Рисунок 43 - Функция распределения поля в ГЦП-анализаторе

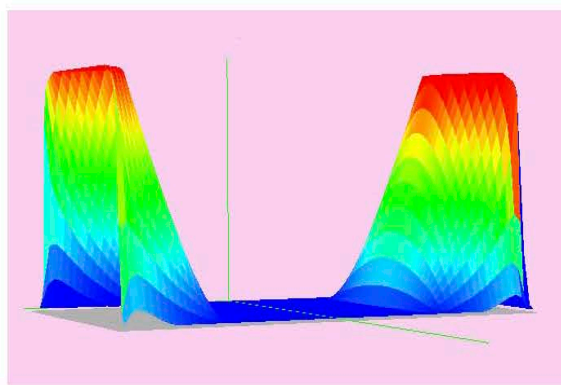
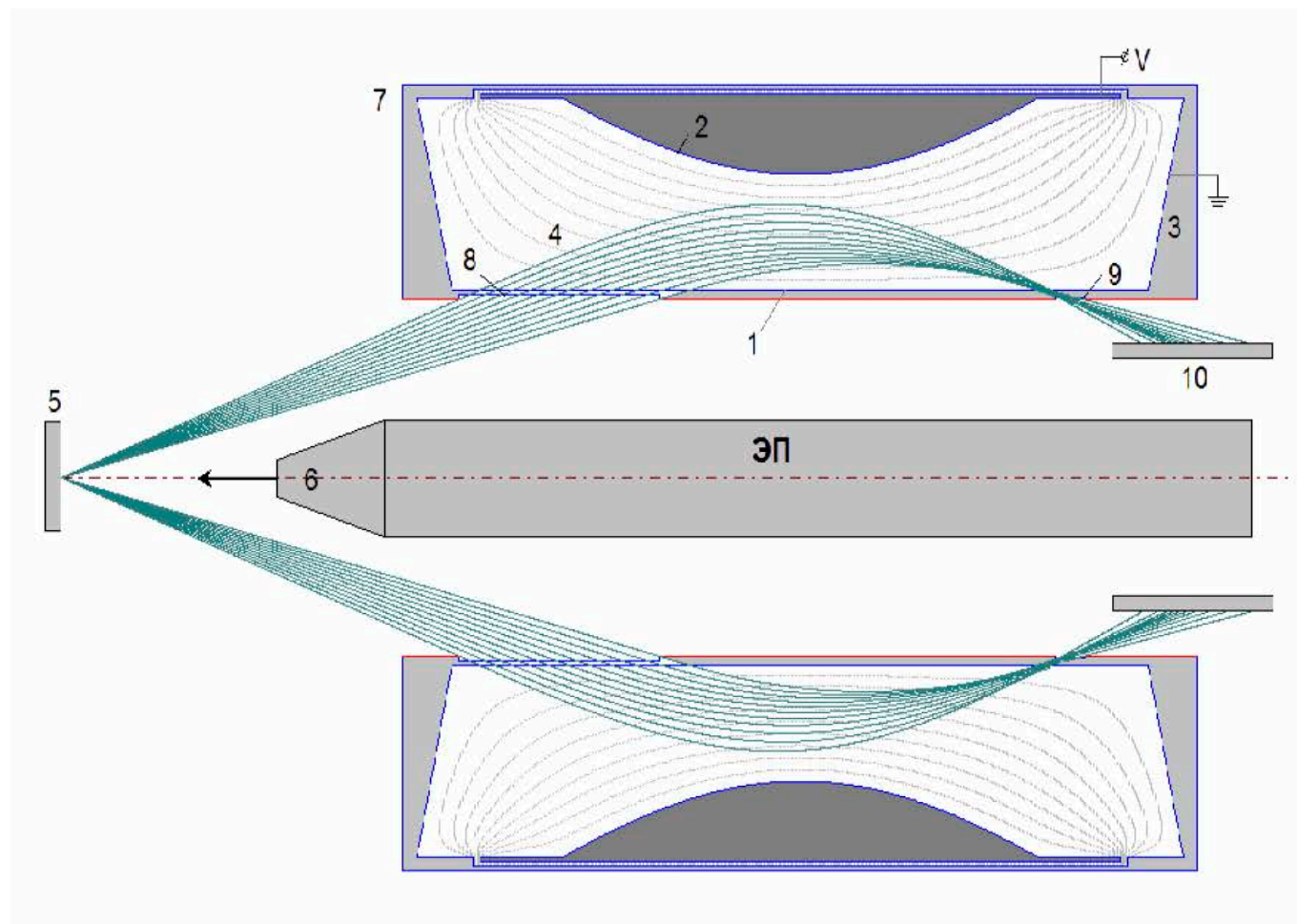


Рисунок 44 - Трехмерное изображение сечения картины электростатического поля

На рисунке 45 приведено множество траекторий частиц с энергией $E/V=1,3$, вылетающих из точечного источника с координатами $X, Y (0,0)$ в диапазоне начальных углов ввода 25^0-35^0 в электронно-оптической схеме длиннофокусного ГЦП-анализатора при $\mu=1$ и $\gamma=-1$. Общая протяженность электронно-оптической схемы – 19. Потенциал внешнего электрода с криволинейным профилем (2) равен 1. Радиус внутреннего цилиндрического электрода (1) 4. Внутренний цилиндрический (1) и торцевые электроды (3) под нулевым потенциалом. Профиль внешнего электрода (2) определен из расчета эквипотенциальных линий в ГЦП с помощью программы MathCAD. Исследуемый образец (5) расположен на расстоянии $z=4,9$ от анализатора. Анализатор окружен магнитным экраном (7) для уменьшения влияния магнитного поля Земли. Источником электронов служит электронная пушка, ось которой совпадает с осью симметрии анализатора.



1 – цилиндрический электрод, 2 – внешний электрод с криволинейным профилем, 3 – торцевые электроды, 4 – вторичные электроны, 5 – исследуемый образец, 6 – первичные электроны, 7 – магнитный экран, 8 и 9 – входная и выходная щели, 10 – детектор, ЭП – электронная пушка

Рисунок 45 - Электронно-оптическая схема длиннофокусного ГЦП - анализатора при $\mu=1$ и $\gamma=-1$, обеспечивающая режим угловой фокусировки «ось-кольцо»

Из рисунка 45 видно, как вторичные электроны (4), возбужденные из исследуемого образца (5) первичным излучением (6) (электронами), через специальное входное окно (8) во внутреннем цилиндре, натянутое одномерной сеткой, попадают в ГЦП и при своем движении отклоняясь к оси цилиндра, фокусируются на поверхности цилиндрического электрода. Электроны, прошедшие сквозь сетку выходного окна (9) во внутреннем цилиндре (1), регистрируются детектором (10). В схеме выполняется режим угловой фокусировки второго порядка типа «ось-кольцо» [177]. Входное и выходное щели в анализаторе затягиваются одномерными мелкоструктурными металлическими сетками, рассеивающие пучок только по азимуту.

Моделирование электронно-оптической схемы показало возможность достижения фокусировки второго порядка вблизи угла вылета из источника порядка 30^0 . Данная схема обеспечивает эффективную транспортировку потока частиц в диапазоне углов эмиссии 30 ± 5^0 на детектор, и тем самым решает задачу повышения чувствительности прибора.

В таблице 8 представлены результаты расчета фокусирующих свойств ГЦП при $\mu=1$ и $\gamma=-1$ в режиме угловой фокусировки «ось-кольцо».

Таблица 8 - Фокусирующие свойства ГЦП при $\mu=1$ и $\gamma=-1$

Порядок фокусировки	2
Центральный угол фокусировки	30^0
$X_{\text{фос}}$ координата точки фокуса	14,3
$Y_{\text{фос}}$ координата точки фокуса	4
Параметр отражения	0,96

На рисунке 46 представлена аппаратная функция ГЦП анализатора при $\mu=1$ и $\gamma=-1$. При расчете аппаратной функции анализатора диапазон начальных углов ввода частиц составлял $\alpha=25^0-35^0$, начальный энергетический диапазон 1.29-1.31. Относительное энергетическое разрешение $\Delta E/E_0$ на полувысоте аппаратной функции анализатора составляет 0,3% при светосиле $\Omega/4\pi=8,71\%$. Здесь E_0 – энергия, соответствующая максимуму функции пропускания. Теоретически рассчитанные параметры анализатора оказываются лучше аналогичных параметров классического цилиндрического зеркала.

Численное моделирование показало, что разработанный энергоанализатор на основе суперпозиции цилиндрического поля $\mu=1$ и кругового гексаполя $\gamma=-1$ обладает существенными преимуществами по сравнению с традиционными типами энергоанализаторов. Высокая светосила, высокое энергетическое разрешение, большое расстояние образец - анализатор, а также относительно легкая реализация расчетов профиля внешнего криволинейного электрода являются важными характеристиками разработанного энергоанализатора.

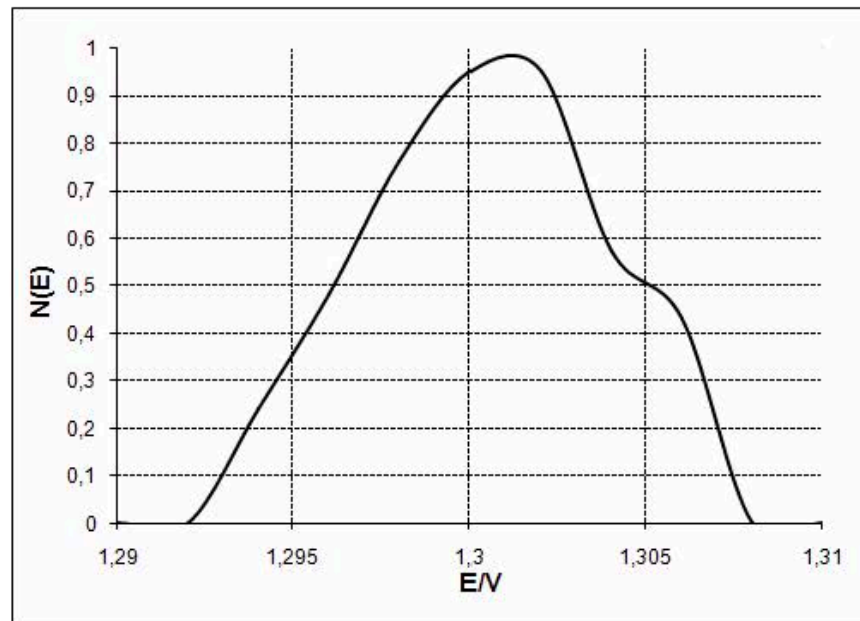


Рисунок 46 – Аппаратная функция ГЦП - анализатора при $\mu=1$ и $\gamma=-1$ в режиме фокусировки «ось-кольцо»

Данные характеристики позволяют использовать предложенный анализатор не только в оже-электронной спектроскопии, но и в фотоэлектронной спектроскопии с различными режимами возбуждения. Наличие у ГЦП - анализатора торцевых электродов, ограничивающих продольные габариты анализатора, позволяет свести к минимуму влияние краевых полей на распределение поля [178]. Предложенный энергоанализатор на основе ГЦП при $\mu=1$ и $\gamma=-1$ является мощным средством для измерения энергии распределения электронов с высокой светосилой и энергетическим разрешением.

Таким образом, предложена схема длиннофокусного гексапольно-цилиндрического анализатора. Показана возможность использования предложенной схемы при проектировании длиннофокусного оже-микронзонда для локального анализа вещества.

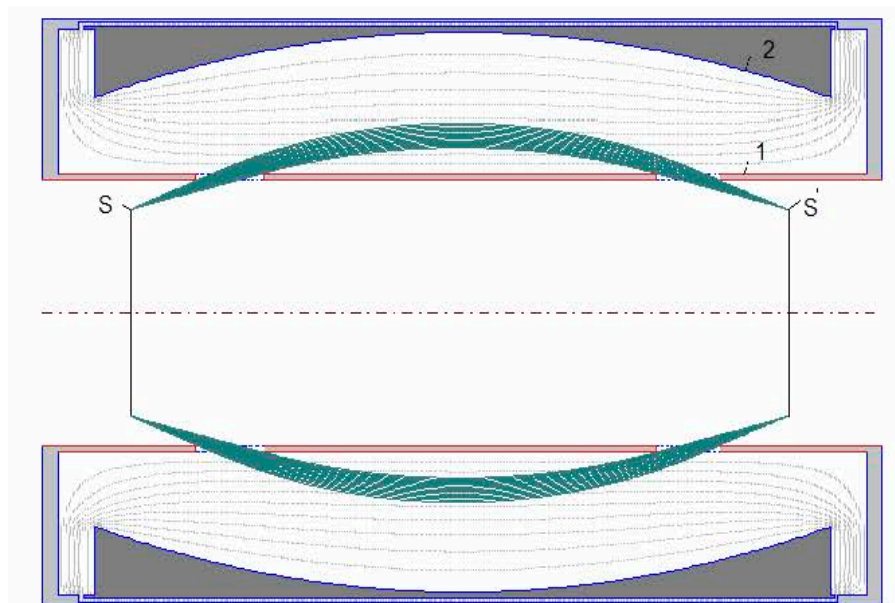
4.3 Численное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора при $\mu=2$, $\gamma=1$

В данном подразделе приведены результаты численного моделирования электронно-оптической схемы энергоанализатора, на основе ГЦП при $\mu=2$, $\gamma=1$ посредством численной программы «Фокус». В данной схеме потенциал ГЦП в системе координат r, z описывается следующим выражением

$$U(r, z) = 2 \ln r + U_h(r, z) \quad (75)$$

В работе [179] приближенно-аналитическим методом рассчитаны электронно-оптические характеристики ГЦП анализатора с распределением поля $\mu = 2$, $\gamma = 1$, найден режим угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо».

На рисунке 47 представлена схема угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо» ГЦП - анализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$. Общая протяженность электронно-оптической системы – 11,4. Потенциал внешнего электрода с криволинейным профилем (2) равен 1. Радиус внутреннего цилиндрического электрода (1) равен 4,2. Внутренний цилиндрический электрод под нулевым потенциалом. Согласно схеме (рисунок 47), заряженные частицы летят из тонкого кольцевого электронно-оптического источника S в интервале полярных углов от 31° до 44° , далее попадают через входную щель в ГЦП, под действием потенциала на внешнем электроде криволинейного профиля отклоняются обратно, и фокусируются в кольцо S' . В системе выполняется фокусировка типа «кольцо-кольцо». Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода $E/V = 1$. Положение источника – $x = 1,2$; $y = 3,120$. Шаг изменения начального входного угла 1° .



1 – цилиндрический электрод, 2 – внешний отклоняющий электрод с криволинейным профилем, S – кольцевой источник, S' – кольцевое изображение

Рисунок 47 - Схема угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо» в ГЦП-анализаторе при $\mu = 2$, $\gamma = 1$

Для расчета аппаратной функции ГЦП - анализатора в режиме угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо» запускаются частицы из электронно-оптического источника, помещенного вблизи внутреннего цилиндрического электрода, в диапазоне начальных углов $31-44^\circ$ и в диапазоне начальных энергий (а точнее E/V) 0,995-1,005, где V – максимальный потенциал.

На рисунке 48 представлена аппаратная функция ГЦП анализатора для угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо». Относительное энергетическое разрешение на полувысоте аппаратной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы $0.0085R_{in}$ составляет 0,55% при светосиле $\Omega/2\pi=10\%$.

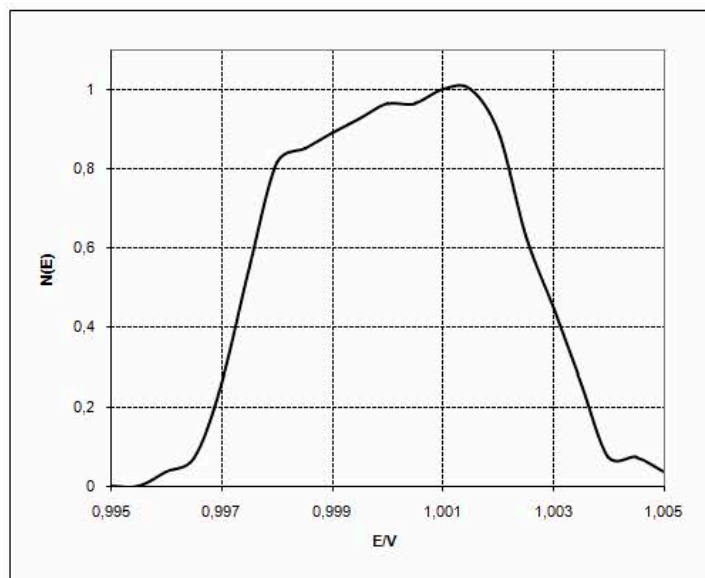


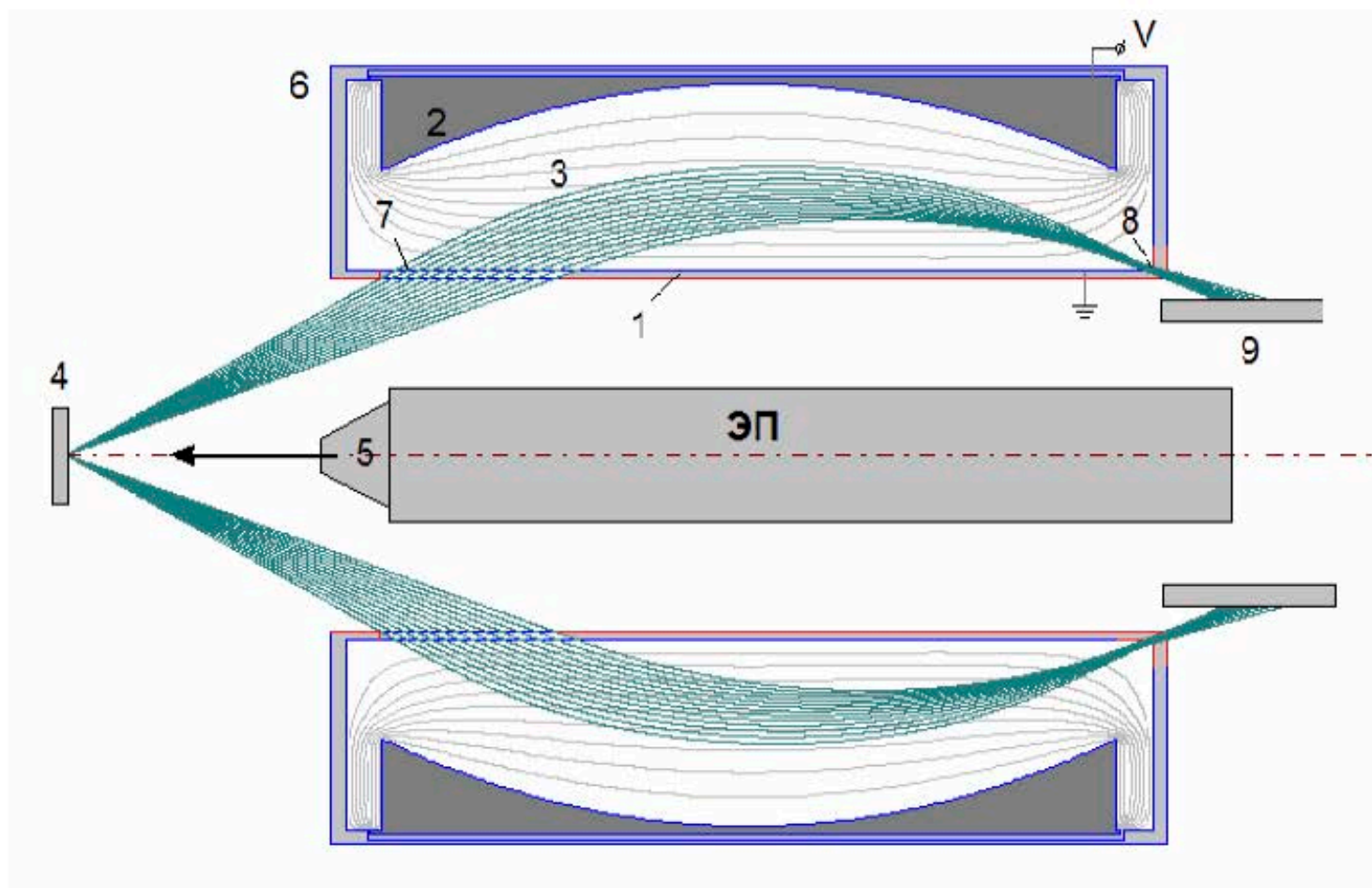
Рисунок 48 - Аппаратная функция ГЦП - анализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$ (режим угловой фокусировки типа «кольцо-кольцо»)

Найдено, что в данной электронно-оптической системе ГЦП анализатора так же выполняется угловая фокусировка второго порядка типа «ось-кольцо». В этом случае расстояние от исследуемого образца до анализатора составляет $z = 3,6$ [180]. В таблице 9 представлены результаты расчетов фокусирующих свойств ГЦП - анализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$ для различных типов угловой фокусировки второго порядка.

На рисунке 49 представлена схема угловой фокусировки типа «ось-кольцо» в ГЦП – анализаторе при $\mu = 2$, $\gamma = 1$. Интервал начальных углов вылета заряженных частиц от 31° до 43° . Отношение энергии заряженной частицы к потенциалу электрода $E/V=1,4$. Положение точечного источника – $x = 0$; $y = 0$. Шаг изменения угла ввода частиц 1° . Электронная пушка располагается в области внутреннего цилиндрического электрода

Таблица 9 - Фокусирующие свойства ГЦП - анализатора при $\mu=2$ и $\gamma=1$ для различных типов угловой фокусировки второго порядка

Тип фоку сировки	«кольцо-кольцо»	«ось-кольцо»
порядок фоку сировки	2	2
центральный угол фоку сировки	34°	$41,37^\circ$
X координата фоку сировки	10,18	15,48
Y координата фоку сировки	3,072	3,65
параметр отражения	1	1



1 – цилиндрический электрод, 2 – внешний электрод с криволинейным профилем, 3 – вторичные электроны, 4 – исследуемый образец, 5 – первичные электроны, 6 – магнитный экран, 7 и 8 – входная и выходная щели, 9 – детектор, ЭП – электронная пушка

Рисунок 49 - Схема угловой фокусировки типа «ось-кольцо» в ГЦП-анализаторе при $\mu = 2$, $\gamma = 1$

Согласно рисунку 49 вторичные электроны (3), эмитированные под действием первичного излучения (5) с поверхности исследуемого образца (4), попадают через входную щель (7) в область анализирующего ГЦП, после отражаются от внешнего отклоняющего электрода (2), фокусируются в кольцевое изображение на поверхности внутреннего цилиндрического электрода (1). Далее проходят через выходную щель (8), и регистрируются детектором (9). Данная схема со встроенной электронной пушкой обладает большим фокусным расстоянием от исследуемого образца до анализатора.

Для расчета аппаратной функции диафрагму расположили на поверхности внутреннего цилиндрического электрода. Диапазон начальных углов ввода частиц $31-43^\circ$, диапазон начальных энергий (а точнее E/V) 1,37-1,45. На рисунке 50 представлена аппаратная функция электронно-оптической схемы ГЦП - анализатора для случая угловой фокусировки типа «ось-кольцо».

Относительное энергетическое разрешение на полувывоте аппаратной функции анализатора с радиусом выходной диафрагмы $0.058R_{in}$ составляет 0,57% при светосиле $\Omega/2\pi=12,6\%$.

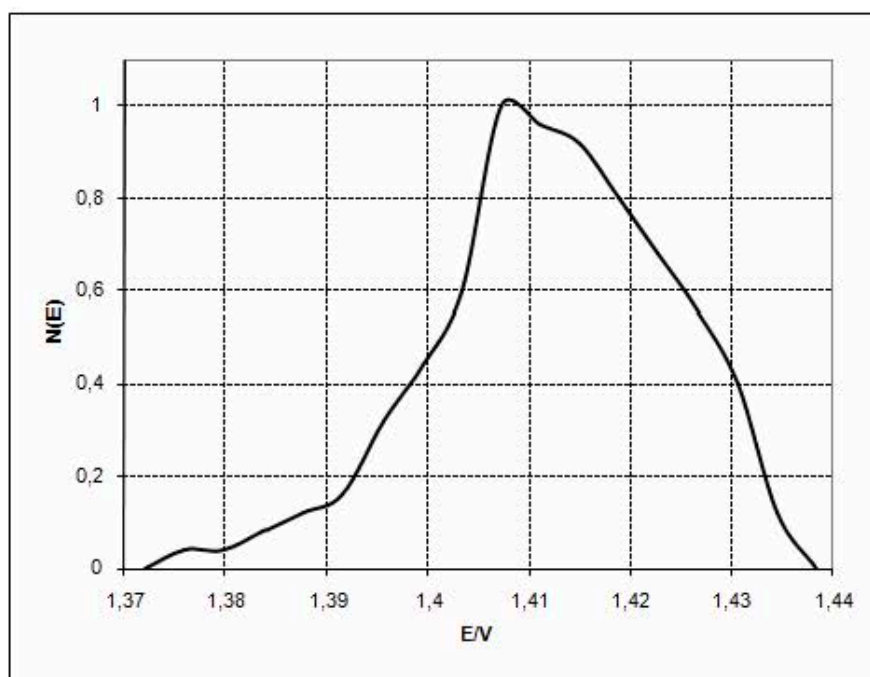


Рисунок 50 - Аппаратная функция ГЦП – анализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$ (режим угловой фокусировки типа «ось-кольцо»)

Таким образом, получена численная модель электронно-оптической схемы ГЦП – анализатора при $\mu = 2$, $\gamma = 1$. Рассчитаны аппаратные функции анализатора в режимах угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо», «ось-кольцо». Определены электронно-оптические параметры ГЦП-анализатора для угловой фокусировки второго порядка типа «кольцо-кольцо», «ось-кольцо» посредством численных расчетов. Установлено, что на основе ГЦП могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой второго порядка. Предлагаемый зеркальный анализатор на

основе гексапольно-цилиндрического поля за счет возможности острой фокусировки широких пучков заряженных частиц имеет значительное преимущество в разрешающей способности по сравнению с существующими аналогичными электронными зеркалами.

Практически реализуемая схема угловой фокусировки типа «ось-кольцо» с большим фокусным расстоянием дает возможность использовать ее в качестве диспергирующего элемента в системе для локального элементного анализа областей микро- и нанометровых масштабов.

Разработанная длиннофокусная система на основе ГЦП, работающая в режиме угловой фокусировки типа «ось - кольцо» дает возможность тривиальной интеграции со средствами альтернативных физических методов исследования веществ. Разработанная система удовлетворяет все основные требования, такие как малые габариты анализатора (компактность) и большое расстояние от исследуемого образца до анализатора и способна решать актуальные научные задачи прикладного и фундаментального характера в области анализа существующих и синтеза новых материалов, структур и приборов микро- и нанoeлектроники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложены и рассчитаны электронно-оптические схемы электростатических энергоанализаторов потоков заряженных частиц. На основе теоретических схем разработаны энергоанализаторы с высокими электронно-оптическими характеристиками и широкими функциональными возможностями, предназначенные для решения наиболее актуальных проблем электронной спектроскопии поверхности твердого тела.

К наиболее важным результатам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Установлено, что задачу о спрямлении линии фокусов в двухкаскадном цилиндрическом зеркале, можно решить путем введения третьего дополнительного внутреннего коаксиального цилиндрического электрода. Это дает возможность перевода электронного спектрометра ESA-12 в режим спектрографа для одновременной регистрации частиц с энергетическим диапазоном 20%.

2. Проведен расчет и моделирование систем, комбинированных из цилиндрического и гиперболического зеркал. Определены параметры наиболее оптимальной схемы энергоанализатора в режиме угловой фокусировки II порядка. Схема способна работать в режиме высокой разрешающей способности и высокой светосилы. Такое сочетание с возможностью анализировать пучки заряженных частиц, выходящих из источника под углами 90° , позволяет использовать эту схему в качестве спектрометра с энергоугловым разрешением.

3. Исследованы электронно-оптические свойства гексапольно-цилиндрического поля с различными вкладами цилиндрического поля и гексаполя. Установлено, что на основе этого поля могут быть построены светосильные энергоанализаторы с угловой фокусировкой II и III порядков, если источник и его изображение находятся в области внутреннего цилиндрического электрода. Определены характеристики анализатора с угловой фокусировкой близкой к идеальной, обеспечивающей режим работы в условиях высокой разрешающей способности и высокой светосилы.

4. Две схемы длиннофокусных энергоанализаторов на базе неоднородных по оси симметрии электростатических гексапольно-цилиндрических полей могут быть использованы при проектировании длиннофокусного оже-микронзонда для локального анализа вещества.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Углов В.В., Черенда Н.Н., Анищик В.М. Методы анализа элементного состава поверхностных слоев. - Мн.: БГУ. 2007. – 158 с.
- 2 Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. – М.: Мир. 1989. – 568 с.
- 3 Зигбан К., Нордлинг Т., Фальман А., Нордберг Р. Электронная спектроскопия. – М.: Мир. 1971. – 493 с.
- 4 Силадьи М. Электронная и ионная оптика. – М.: Мир. 1990. – 639 с.
- 5 Глазер В. Основы электронной оптики. – М.: Гос.изд.техн.-теор. литературы. 1957. – 763 с.
- 6 Козлов И.Г. Методы энергетического анализа электронных потоков. - М.: Атомиздат. 1971. - 189 с.
- 7 Кульментьев А.И., Кульментьева О.П. Методы анализа поверхности твердых тел. - Сумы: СумГУ. 2008. - 158 с.
- 8 Афанасьев В.П. Электронная и ионная спектроскопия твердых тел // Соросовский Образовательный Журнал. – 1999. – Т. 5, № 2. – С.110–116.
- 9 Афанасьев В.П., Явор С.Я. Электростатические энергоанализаторы для пучков заряженных частиц. - М.: Наука. 1978. - 224 с.
- 10 Hamada Y., Fujisawa A., Iguchi H., Nishizawa A., Kawasumi Y. A tandem parallel plate analyzer // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – V. 68, No. 5. - P. 2020-2022.
- 11 Boumsellek S., Tuan V.N., Esaulov V.A. Electrostatic analyzer and optics for low – energy electron spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. – 1990. - V.61, No. 7. - P. 1854-1857.
- 12 Yuan D., Kuo T., Cojocar G., Jayamanna K., McDonald M., Schmor P., Yin Y. Design of a parallel-plate energy spread analyzer // Rev. Sci. Instrum. – 1998. – V.69, No. 2. - P. 1194-1196.
- 13 Calabrese D., Yenen O., Wiese L.M, Jaecks D. H. Two-stage parallel-plate energy analyzer for simultaneous detection of positive, negative, and neutral particles // Rev. Sci. Instrum. – 1994. - V. 65, No. 1. - P. 116-122.
- 14 Фишкова Т.Я. Система монохроматизации электронного пучка // Прикладная физика. - 2011. - №2. - С.33-36.
- 15 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я., Шпак Е.В. Цилиндрическое зеркало с закрытыми торцами для анализа по энергии вторичных пучков заряженных частиц со сканированием поверхности образца // Письма в ЖТФ. – 1995. - Т.21, Вып.21. - С. 19-22.
- 16 Трубицын А.А. Новый электростатический анализатор с угловым и энергетическим разрешением//Письма в ЖТФ. - 1995. - Т.21, Вып.13. - С.19-22.
- 17 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U. Cylindrical mirror analyzer with adjustable angular focusing // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1998. - V. 94, Is.1-2. – P.89-96.
- 18 Yi-sha Ku, Ching-shen Su. Design and performance of a cylindrical reflection mirror analyzer for low energy ion scattering studies // Rev.Sci.Instrum. - 1991. - V.62, No. 6. - P.1471-1474.

- 19 Read F.H., Cubric D., Kumashiro S., Walker A. The parallel cylindrical mirror analyzer: axis-to-axis configuration // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2004. - A 519. – P. 338–344.
- 20 Zou Y., Cui Y., Yun V., Valfells A. and other. Compact high-resolution retarding field energy analyzer for space-charge-dominated electron beams // Phys.rev.special topics - accelerators and beams. – 2002. – V. 5, 072801. - P.1-7.
- 21 Tokesi K., Kover L., Varga D. A modified distorted field electrostatic analyzer // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1994. - A 348. - P.173-176.
- 22 Овсянникова Л. П., Фишкова Т. Я. Электростатический энергофильтр с двойной фокусировкой // Прикладная физика. – 2008. - №5. - С.86-88.
- 23 Bundaleski N., Rakocovic Z., Terzic I. Optical properties of the 127⁰ cylindrical energy analyzer used in LEIS experiments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2002. - B 198. - P. 208-219.
- 24 Iwamoto K., Matsumoto A. Ion energy loss spectroscopic apparatus using cylindrical electrostatic energy analyzer equipped with the Matsuda plate // Rev. Sci. Instrum. - 1997. - V. 68, No. 8. - P. 3042-3045.
- 25 Fujisawa A., Iguchi H., Sasao M., Hamada Y. Second-order focusing property of 210⁰ cylindrical energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. –1995. – V.66, No.3. - P. 2524- 2527.
- 26 Williams J.F., Chen X., Wilkie P. Miniature electrostatic electron energy analyzers and S-shaped deflector // Rev.Sci.Instrum. – 2008. –V.79, 023104. - P.1-4.
- 27 Ishii K., Ohkawara H., Maeda Y., Katanuma I., Yatsu K., Miyoshi S. The energy component analyzer and spectrum analysis of end-loss ions in a tandem mirror // Rev. Sci. Instrum. – 1991. – V. 62, No.4. - P.899-905.
- 28 Read F.H. The parallel cylindrical mirror electron energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. – 2002. – V.73, No. 3. - P. 1129-1139.
- 29 Rubio-Zuazo J., Escher M., Merkel M., Castro G.R. High Voltage-Cylinder Sector Analyzer 300/15: A cylindrical sector analyzer for electron kinetic energies up to 15 keV // Rev. Sci. Instrum. – 2010. – V.81, 043304. - P. 1-8.
- 30 Varga D., Tokesi K., Rajta I. Design of an electrostatic electron spectrometer for simultaneous energy and angular distribution measurements // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1995. – V. 76. - P. 433- 436.
- 31 Teodorescu C. M., Gravel D., Ruhl E. and other. Retractable miniature double pass cylindrical mirror analyzers// Rev. Sci. Instrum. – 1998. – V.69, No.11. - P. 3805-3808.
- 32 Petrov V.N., Kamochkin A.S. Energy analyzer for spin polarized Auger electron spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. - 2004. - V. 75, No. 5. - P. 1274-1279.
- 33 Kobayashi E., Seo J., Nambu A., Mase K. Development of a miniature double-pass cylindrical mirror electron energy analyzer (DPCMA), and its application to Auger photoelectron coincidence spectroscopy (APECS) // Surface Science. – 2007. – V.601. – P. 3589–3592.
- 34 Koscielniak P., Kaszczyszyn S., Szuber J. A new type of electron energy analyzer based on three coaxial cylindrical electrodes for Auger electron spectroscopy // Vacuum. – 2001. – V. 63, P.361-66.

- 35 Dogan M., Sise O., Ulu M.. Design of electron energy analyzers for electron impact studies // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2007. – V.76. – P. 445–449.
- 36 Давыдов С.Н., Данилов М.М., Кораблев В.В. Сферическое зеркало как инструмент для электронной спектроскопии совпадений // *ЖТФ*. – 1999. - Т.69, Вып.1. - С.109-113.
- 37 Berntsen M.H., Palmgren P., Leandersson M. and other. A spin- and angle-resolving photoelectron spectrometer// *Rev. Sci. Instrum.* – 2010. – V.81, 035104. - P. 1-5.
- 38 Belov V.D., Yavor M.I. High-resolution energy analyzer for photoelectron diffraction studies // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2007. - A 575. – P. 262–265.
- 39 Baraldi A., Dhanak V.R. Design study of a double pass hemispherical electron energy analyser with multichannel detection // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* - 1994. – V.67. – P. 211-220.
- 40 Запквара В.В., Ильин А.М., Крючков В.Ф. Два случая фокусировки осесимметричного пучка заряженных частиц в гиперболическом поле // *ЖТФ*. – 1976. - Т.46. - С.1572-1573.
- 41 Мамонтов Е.В., Ивлев Д.А. Гиперболоидный масс-спектрометр на усеченной ловушке // *Письма в ЖТФ*. – 1999. - Т.25., Вып.10. - С. 51-56.
- 42 Jacka M., Kirk M., El Gomati M. M., Prutton M. A fast, parallel acquisition, electron energy analyzer: The hyperbolic field analyzer // *Rev. Sci. Instrum.* – 1999. - V.70, No.5. - P. 2282-2287.
- 43 Jacka M., Kale A., Traitler N. Hyperbolic field electron energy analyzer with second order focusing // *Rev. Sci. Instrum.* – 2003. – V.74, No.10. - P. 4298-4300.
- 44 Iwasaki K., Mitsuke K. Development of a conical energy analyzer for angle-resolved photoelectron spectroscopy // *Surface Review and Letters*. – 2002. – V.9, No.1. – P. 583-586.
- 45 Khursheed A. Design of a parallel magnetic box energy analyzer attachment for electron microscopes // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* -2011. – V. 184. – P.57–61.
- 46 Miron C., Simon M., Leclercq N., Morin P. New high luminosity «double toroidal» electron spectrometer // *Rev. Sci. Instrum.* – 1997. – V. 68, No.10. - P. 3728-3737.
- 47 Nishimura T., Ikeda A., Kido Y. A new toroidal electrostatic analyzer and application to surface analysis // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V.69, No.4, - P.1671-1675.
- 48 Belov V.D., Yavor M.I. New type of high-resolution high-transmission energy analyzers based on toroidal mirrors // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* – 1999. - V.104. – P. 47-54.
- 49 Tadich A., Riley J., Huwald E. and other. Full Hemisphere Fermi Surface Mapping Using A Novel Toroidal Electron Spectrometer // *The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation*. – Melbourne, 2009. -943p.

- 50 Трубицын А.А. Моделирование ионно-оптических систем для масс-спектрометров с квадрупольным фильтром масс // ЖТФ (Краткие сообщения). - 2003. - Т.73, Вып.6. - С. 136-137.
- 51 Le Guen K., Ceolin D., Guillemin R. and other. Development of a four-element conical electron lens dedicated to high resolution Auger electron-ion(s) coincidence experiments // Rev. Sci. Instrum. - 2002. - V. 73, No 11. - P. 3885-3894.
- 52 Белов В.Д. Иммерсионные линзы в аксиально-симметричных электростатических системах сферического секторного дефлектора с пространственной фокусировкой второго порядка // Научное приборостроение. - 2006. - Т.16, № 4. - С. 31-40.
- 53 Фишкова Т.Я. Комбинированная электростатическая линза // Письма в ЖТФ. - 2009. - Т.35, Вып.9. - С. 31-36.
- 54 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U. Time-of-flight focusing in a system consisting of electrostatic mirrors with two-dimensional fields// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1995. - A 364, Is.3. - P.401-408.
- 55 Hansch P., Norby J.R., Evans S.H., Van Woerkom L.D. An ellipsoidal mirror time-of-flight photoelectron energy analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1995. - T.66, No.12. - P. 5512-5515.
- 56 Семкин Н.Д., Пияков И.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. Перспективы развития времяпролетных масс-спектрометров для анализа газовых и пылевых частиц// Прикладная физика. - 2002. - № 2. - С. 124-141.
- 57 Веренчиков А.Н., Явор М.И., Хасин Ю.И., Гаврик М.А. Многоотражательный планарный времяпролетный масс-анализатор I. Анализатор для параллельного tandemного спектрометра // ЖТФ. - 2005. - Т.75, Вып.1. - С.74-83.
- 58 Hilbert A., Barwick B., Fabrikant M., Uiterwaal C.J.G.J., Batelaan H.. A high repetition rate time-of-flight electron energy analyzer // Applied physics letters. - 2007. - V.91, 173506. - P. 1-3.
- 59 Zashkvara V.V., Masyagin V.E., Ashimbaeva B.U., Kovalik A. and other. Verification of focusing properties of the multicascade electrostatic analyzer // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 1995. - V.71. - P.87 - 92.
- 60 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Магнитостатический масс-анализатор типа плоского зеркала с фокусировкой второго порядка // Письма ЖТФ. - 2002. - Т.28, Вып. 4. - С.65-70.
- 61 Trubitsyn A.A. Cylindrical mirror analyzer with high energy resolution // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 1995. - V.73. - P. 305-310.
- 62 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Электростатический спектрограф в виде усеченного цилиндра // ЖТФ. - 2001. - Т.71, Вып.11. - С.133-135.
- 63 Belov V.D., Yavor M.I. High-resolution energy analyzer with a large angular acceptance for photoelectron spectromicroscopy applications// Rev. Sci. Instrum. - 2000. - V.71, No. 4. - P.1651-1655.
- 64 Downie P., Reynolds D.J., Powis I. Parallel, multichannel energy and angle resolving electrostatic electron analyzer // Rev. Sci. Instrum. - 1995. - V.66, No.7. - P. 3807-3818.

- 65 Kienle M., Plies E. An off-axis multi-channel analyzer for secondary electrons // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research.* – 2004. - A 519. – P. 325–330.
- 66 David D.E., Popovic D.B., Antic D., Michl J. A multichannel electron energy loss spectrometer for low-temperature condensed films // *J. of Chem.Phys.* - 2004. – V.121, No. 21, - P.10542 -10550.
- 67 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Многоканальный энергофильтр в виде цилиндра с закрытыми торцами и осевым нитевидным электродом // *Письма ЖТФ.* – 2004. - Т.30, Вып. 20. - С.25-29.
- 68 Cizmar P., Müllerová I., Jacka M., Pratt A. New multichannel electron energy analyzer with cylindrically symmetrical electrostatic field // *Rev. Sci. Instrum.* - 2007. - V.78, 053714. - P. 1-5.
- 69 Tepermeister I., Sawin H.H. Modeling and construction of a novel electron energy analyzer for rapid X-ray photoelectron spectroscopy spectra acquisition // *Rev. Sci. Instrum.* – 1992. –V.83, No. 8. - P. 3828- 3834.
- 70 Hu D.Q., Leung K.T. Simion study of the fringing field effects in deflector-type electrostatic electron energy analyzers: A new flexible Jost-based correction scheme // *Rev. Sci. Instrum.* – 1995. – V.66, No.4. - P. 2865-2870.
- 71 Kelly M.A. A new electron energy analyzer for electron spectroscopy // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* - 1999. - V.98–99. – P.55–66.
- 72 Shiraki S., Ishii H., Nihei Y. Development of a high-performance angle-resolving electron energy analyzer // *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* – 2001. - V.114–116. – P. 1043–1048.
- 73 Nandi T., Ahmad N., Singh H.K., Pillay R.G. Inclined straight electrostatic analyzer // *Rev. Sci. Instrum.* – 2004. – V.75, No.11. - P. 5041-5043.
- 74 Воробьев Г.С., Дрозденко А.А., Нагорный Д.А. Установка для измерения статических характеристик высокоинтенсивных электронных пучков // *Приборы и техника эксперимента.* – 2009. - № 1. - С. 115-118.
- 75 Марьин Б.В., Поландов А.Г. Сегментоидные электростатические анализаторы для регистрации низкоэнергичных заряженных частиц // *Приборы и техника эксперимента.* – 2002. – No. 3. - С. 73-77.
- 76 Голиков Ю.К. Определение электростатических полей по заданным характеристикам движения заряженных и дипольных частиц: автореф. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.04. - Ленинград, 1985. - 20 с.
- 77 Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Чепарухин В.В. Расчет элементов электростатических электронно-оптических систем. - Ленинград: Ленинградский политехнический институт. 1984. – 78 с.
- 78 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Electrostatic axially symmetric multipole in deflector-type analyzers // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research.* – 1992. – A 313. – P. 315-327.
- 79 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Axially symmetric multipole in magnetic analyzers // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research.* – 1992. – A 321. – P. 439-446.

- 80 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Two-sector electrostatic deflector based on superposition of cylindrical field and axially symmetric multipoles // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1993. – A 328. – P. 416-434.
- 81 Запквара В.В., Тындык Н.Н. Осесимметричные электростатические мультиполи, их приложение // ЖТФ. – 1991. – Т.61, №4. – С.148-157.
- 82 Запквара В.В., Тындык Н.Н. Мультипольные решения волнового уравнения // ЖТФ. – 1998. – Т.68, № 6. – С.9-14.
- 83 Zashkvara V.V. On circular multipole calculations // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1995. – A 354. – P. 171-174.
- 84 Запквара В.В., Тындык Н.Н. Нелапласовы круговые мультиполи // ЖТФ. – 1995. – Т.65, Вып. 7. – С.154-1666.
- 85 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. Potential fields based on circular multipole series // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1996. – A 370. – P. 452-460.
- 86 Zashkvara V.V., Tyndyk N.N. The method for the calculation of multipole-cylindrical fields // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1999. – A 370. – P. 223-231.
- 87 Спивак-Лавров И.Ф. Решение задачи Дирихле для уравнения Лапласа в случае многосвязной области с точечной симметрией // ЖТФ. – 1999. – Т.69, Вып.3. – С. 1 - 9.
- 88 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh. Calculation of trajectories in a multipole cylindrical field // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 2002. – V.122. – P.195-202.
- 89 Запквара В.В., Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Масягин В.Е. Расчет траекторий заряженных частиц в электростатическом неоднородном поле // Известия НАН РК, Сер.физ.-мат. – 2000. – №2. – С.72-78.
- 90 Голиков Ю.К., Григорьев Д.В., Шорина Т.А. Электрические поля с кольцевыми особенностями в корпускулярной оптике // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25, Вып.9. – С. 23-27.
- 91 Голиков Ю.К., Уткин К.Г., Григорьев Д.В. Обратные задачи теории электростатических энергоанализаторов. I // ЖТФ. – 1999. – Т.69, Вып.9. – С. 128-131.
- 92 Габдуллин П.Г., Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Давыдов С.Н. Применение формулы Донкина в теории энергоанализаторов. I // ЖТФ. – 2000. – Т.70, Вып. 2. – С. 91-94.
- 93 Габдуллин П.Г., Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Давыдов С.Н. Применение формулы Донкина в теории энергоанализаторов. II // ЖТФ. – 2000. – Т.70, Вып. 3. – С. 44-47.
- 94 Голиков Ю.К., Краснова Н.К. Электрические поля, однородные по Эйлеру, для электронной спектроскопии // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, Вып. 2. – С.9-15.
- 95 Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Соловьев К. В., Григорьев Д. В. О некоторых аналитических связях осесимметричных и двухмерных лапласовых полей // Прикладная физика. – 2004. – №1. – С.48-49.

- 96 Голиков Ю.К., Краснова Н.К., Соловьев К.В. Трехмерные лапласовы потенциалы с комплексным представлением // ЖТФ. – 2006. - Т. 76, Вып.1. - С. 24-27.
- 97 Голиков Ю. К., Соловьев К. В. Новые аналитические представления мультипольных электромагнитных структур // Прикладная физика. – 2006. – №6. - С.5-7.
- 98 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U., Chokin K. Sh., Rysavy M. Effect of the fringe field of one-dimensional aperture gratings on the transmission and focusing of the cylindrical mirror analyzer // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1992. - V.58. – P. 271 – 283.
- 99 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Двухпериодный цилиндрический энергоанализатор с торцевыми электродами // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 8. - С. 89-91.
- 100 Явор С.Я. Фокусировка пучков заряженных частиц с распределением энергии по сечению в диспергирующих системах // ЖТФ. -1997. - Т.67, № 12. - С.50-53.
- 101 Явор С.Я. Фокусировка пучков заряженных частиц с энергоугловой корреляцией в плоском конденсаторе // ЖТФ. - 1998. - Т.68, № 10. - С.138-139.
- 102 Голиков Ю. К., Краснова Н. К., Соловьев К. В., Григорьев Д. В., Любчик А. Д. Сопласующие и корректирующие электрические зеркала в электронной оптике // Прикладная физика. - 2002. - № 3. - С. 55-67.
- 103 Голиков Ю.К., Холин Н.А., Шорина Т.А. Теория и практика квазиконических энергоанализаторов // Научное приборостроение. – 2009. - Т.19, №2. - С. 13-24.
- 104 Tsuno K. Electron optical analysis of a high-resolution electron energy loss spectrometer with a retarding Wien filter // Rev. sci. instrum. – 1992. – V. 63, No 9. - P. 4112-4121.
- 105 Mattel R., McBreen P. H. Optimization of the geometric disposition of the deflecting electrodes in HREELS spectrometers // Rev. sci. instrum. - 1992. - V 63, № 5. - P.3007-3012.
- 106 Гликман Л.Г., Голоскоков Ю.В., Карецкая С.П. К теории фокусировки пучков заряженных частиц в двумерном электростатическом поле со средней плоскостью. I // ЖТФ. – 1996. - Т.66, №5. - С. 118-127.
- 107 Демин С.К., Сафронов С.И., Тарасов Р.П. Численный анализ и синтез электронно-оптических систем сложной структуры. I. // ЖТФ. - 1998. - Т.68, №2. - С.97-103.
- 108 Явор М.И. Расчет фокусировки и аберраций пучков заряженных частиц в полярно-тороидальных анализаторах. // ЖТФ. – 1998. - Т. 68, № 4. - С.107-111.
- 109 Дуглас Д.Дж., Глебова Т.А., Коненков Н.В., Судаков М.Ю. Пространственные гармоники поля квадрупольного фильтра масс с круглыми электродами // ЖТФ. - 1999. - Т.69, Вып.10. - С. 96-101.
- 110 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Нагрузочные характеристики электростатической коаксиальной линзы // ЖТФ. – 1999. - Т.69, Вып.6. - С. 123-126.

- 111 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Масс-анализатор зеркального типа с цилиндрической формой полюсов // ЖТФ (краткие сообщения). – 2002. - Т.72, Вып.10. - С.119-123.
- 112 Овсянникова Л.П., Фишкова Т.Я. Энергоанализатор с цилиндрической формой электродов // Письма ЖТФ. - 2004. - Т.30, Вып.7. - С.36-41.
- 113 Sagara T., Boesten L., Nishida S., Okada K. Resolution improvements for hemispherical energy analyzers// Rev. sci. instrum. – 2000. - V.71, No. 11. - P. 4201-4207.
- 114 Kugeler O., Marburger S., Hergenbahn U. Calculation and measurement of the time-of-flight spread in a hemispherical electron energy analyzer // Rev. sci. instrum. – 2003. – V. 74, No. 9. - P. 3955-3961.
- 115 Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние аппаратных функций электростатических и магнитных анализаторов на обработку экспериментальных результатов // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 6. - С. 86-91.
- 116 Курнаев В.А., Урусов В.А. Влияние флуктуаций потенциалов на аппаратные функции электростатических анализаторов // ЖТФ. – 1997. - Т.67, № 6. - С. 92-95.
- 117 Шевченко С.И. Некоторые аспекты работы энергоанализатора типа цилиндрическое зеркало. Ч. I. // Научное приборостроение. – 2011. - Т.21, № 1. - С. 76-86.
- 118 Шевченко С.И. Об особенностях нахождения аксиальных электростатических полей вблизи оси. II. Метод аналитической замены // Научное приборостроение. – 2009. - Т.19, № 1. - С. 58-66.
- 119 Шевченко С.И. Метод вычисления аппаратной функции аксиальных электростатических энергоанализаторов // Научное приборостроение. – 2010. - Т.20, № 2. - С. 73-81.
- 120 Гринфельд Д.Э., Монастырский М.А., Тарасов В.А. Методы возмущений в задачах // Прикладная физика. – 2006. - №3. - С.64-74.
- 121 Protopopov O.D., Trubitsyn A.A. Quasi-conical energy analyzers for electron spectroscopy // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. – 1994. – V.69. - P.159-163.
- 122 Трубицын А.А. Корреляционный метод поиска угловой фокусировки высших порядков//ЖТФ. – 2001. - Т. 71, Вып. 5. - С. 126-127.
- 123 Трубицын А.А. Программа "Фокус" моделирования аксиально-симметричных электронно-оптических систем: алгоритмы и характеристики //Прикладная физика. – 2008. - №2. - С.56-61.
- 124 Астахов В.И., Дягилев А.А., Трубицын А.А. Программный комплекс "Focus Planar System" для моделирования планарных электронно- и ионно-оптических систем // Прикладная физика. – 2010. - №5. - С.66-72.
- 125 Гуров В.С., Трубицын А.А., Мамонтов Е.В., Дягилев А.А. Решение плоской внешней задачи Дирихле методом граничных элементов// Вестник РГРТУ. - 2008. - № 2, Вып. 24. - С. 91-94.

- 126 Скунцев А.А., Трубицын А.А. Численный метод поиска условий пространственной фокусировки высших порядков // Вестник РГРТУ. - 2009. Вестник РГРТУ. - № 4, Вып. 30. - С. 40.
- 127 Помозов Т.В., Явор М.И. Устранение осевого астигматизма в краевых полях сферического секторного дефлектора // Научное приборостроение. - 2008. - Т.18, №4. - С. 120-123.
- 128 Холин Н.А., Шорина Т.А., Кубрик Д. От квазиконических энергоанализаторов к сфероидальным // Научное приборостроение. - 2009. - Т.19, № 2. - С. 25-33.
- 129 Байсанов О.А., Доскеев Г.А., Зарипова З.Г., Спивак-Лавров И.Ф. Дифференциальные уравнения, определяющие отклонение частиц ионного пучка от осевой траектории в электрических и магнитных полях // Прикладная физика. - 2010. - Вып.3. - С.109-115.
- 130 Sise O., Ulu M., Dogan M., Martinez G., Zouros T.J.M. Fringing field optimization of hemispherical deflector analyzers using BEM and FDM // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 2010. - V. 177. - P. 42-51.
- 131 Семенов С.О. Некоторые особенности расчета траекторий заряженных частиц на сетке потенциалов метода конечных элементов // Прикладная физика. - 2010. - Вып.3. - С.96-102.
- 132 Краснова Н.К. Двумерные степенные электронные спектрографы с плоскостью симметрии // ЖТФ. - 2011. - Т.81, Вып.6. - С. 97-103.
- 133 Бадалян Г.В. Получение постоянных электрических полей заданной формы в неявноэлектродной системе // ЖТФ. - 2011. - Т.81, Вып.1. - С.140-143.
- 134 Varga D., Kadar I., Kover A., Kover L., Morik G. An electron spectrometer of double-pass cylindrical mirror type for Nuclear spectroscopy and Atom physics // Nuclear Instruments and Methods. - 1978. - V. 154. - P. 473-483.
- 135 Varga D., Kadar I., Kover A., Cserny I., Morik G. of internal conversion electr., Brabec V., Dragoun O., Kovalik A., Adam J. Electrostatic spectrometer for measurement ons in the 0.1-20 keV region // Nuclear Instruments and Methods. - 1982. - V.192. - P. 277-286.
- 136 Козлов И.Г. Современные проблемы электронной спектроскопии. - М.: Атом. 1978. - 248с.
- 137 Yavor M.I. Optics of Charged Particle Analyzers. - Amsterdam: Acad. 2009. - 677p.
- 138 Саулебеков А.О., Венос Д., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Расчет аппаратной функции электронного спектрометра типа двухкаскадного цилиндрического зеркала // Вестник Карагандинского университета. Серия физика. - 2011. - №2 (62). - С. 56-59.
- 139 Трубицын А.А., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш. Расчет функции отклика для двухкаскадного цилиндрического зеркального анализатора // Материалы XI Междунар. науч. конференции «Физика твердого тела». - Усть-Каменогорск, 2010. - С.527-531.
- 140 Trubitsyn A.A. The sofeware «FOCUS» to simulate axi-symmetrical and planar electron (ion) optical systems// 8 International conference handbook "Charged Particle Optics". - Singapore, 2010. - 208 p.

- 141 Свидетельство о госуд.регистрации программ для ЭВМ 2010612965. Россия. Focus Planar System / В.И.Астахов, А.А. Трубицын. Зарегистр.в Реестре программ для ЭВМ 30.04.2010.
- 142 Zashkvara V.V., Ashimbaeva B.U. Theoretical basis for the scheme of an electrostatic energy- and angle-resolved spectrograph // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. – 1994. – A340. – P. 514-523.
- 143 Pat. 224 666 USA. Cylindrical mirror electrostatic energy analyzer free of third-order angular aberrations / Franzen W. Et al.; 1983.
- 144 Меньшиков К.А. Электростатический анализатор заряженных частиц с тремя коаксиальными цилиндрическими электродами // ЖТФ. - 1982.- Т. 52. - Вып.11. - С. 2245-2252.
- 145 Горелик В.А., Машинский Ю.П., Пиковская Т.М., Протопопов О.Д. Трехкаскадный цилиндрический зеркальный энергоанализатор с фокусировкой четвертого порядка // ЖТФ.- 1985.- Т. 55, Вып.2.- С. 412-414.
- 146 Klein S., Kaszczyszyn S., Grzeszczak A., Kościelniak P. Theoretical analysis of electro-optical characteristics of the modified three cylindrical mirror analyzer // Optica Applicata. - 2010. - V. XL., No.2. - P. 521-526.
- 147 Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т., Тусупбекова А.К. Изучение возможности перевода электронного спектрометра ESA-12 типа «двухкаскадное цилиндрическое зеркало» в режим спектрографа // Материалы 8-ой межд. науч.конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент», посвящ.40-летию КарГУ им.Е.А.Букетова. – Караганда, 2012. – С. 580 – 586.
- 148 Saulebekov A.O., Assylbekova S.N., Kambarova Zh.T., Tussupbekova A.K. Study of the possibility of transfer of ESA-12 electron spectrometer of double pass cylindrical mirror type into a spectrograph mode // Eurasian Physical Technical Journal. - 2012. - V.9, No.1 (17). - P. 14-20.
- 149 Зашквара В.В., Верменичев Б.М., Ноеренчук А.Н. Электростатический анализатор для спектроскопии с энергоугловым разрешением // ЖТФ. - 1990. - Т.60, Вып. 4. - С.201-202.
- 150 Зашквара В.В., Саулебеков А.О., Юрчак Л.С., Часников А.И. Электронно-оптические свойства электростатического сферического зеркала и систем на его основе // ЖТФ. - 1992. - Т.62, Вып.6. - С.189-204.
- 151 Siegbahn K., Kholine N., Golikov G. A high resolution and large transmission electron spectrometer // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. - 1997. - A384. - P. 563-574.
- 152 Зашквара В.В., Корсунский М.И., Космачев О.С. Фокусирующие свойства электростатического зеркала с цилиндрическим полем // ЖТФ. - 1966. - Т. 36, № 1. - С. 132-138.
- 153 Hanson G.V., Goldberg B., Bachrach R.Z. Angle-resolved electron spectrometer with multidetection // Rev. Sci. Instrum. - 1981. - V.52, № 4. - P.517-522.
- 154 Зашквара В.В., Ашимбаева Б.У., Саулебеков А.О., Тажибаева С.Д. Теоретическое обоснование спектрографа для фотоэлектронной спектроскопии

с угловым разрешением // Известия НАН РК, серия физ.-мат. - 1994. - №2. - С.75-81.

155 Trubitsyn A.A. Simulation of Ion-Optical Systems for Mass Spectrometers with a Quadrupole Mass Filter // Technical Physics. - 2003. - V.48, No. 6. - P.793-794.

156 Trubitsyn A.A. The software «FOCUS» to simulate axi-symmetrical and planar electron (ion) optical systems// 8 International conference handbook «Charged Particle Optics». - Singapore, 2010. - 208 p.

157 Камбарова Ж.Т. Гиперболическое электростатическое зеркало // Материалы Международного молодежного научного форума «Ломоносов-2010». - М., 2010. - С.1-2.

158 Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T., Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh. Modeling of system on the basis of electrostatic cylindrical and hyperbolic mirrors // Education and science without borders. - 2011. - V.2, № 4(2). - P.133-135.

159 Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т. Моделирование электростатической системы из цилиндрического и гиперболического зеркал // Материалы тезисов Десятого Всероссийского семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики. – М., 2011. - 54 с.

160 Ricz S., Kövér Á., Juvansuu M., Varga D., Molnár J., Aksela S. High-resolution photoelectron - Auger-electron coincidence study for the L23-M23M23 transitions of argon // Phys. Rev. - 2002. – A 65. 042707.

161 Kover A., Varga D., Szabo Gy, Berenyi D., Kadar I., Vegh J. Hock G. A study of the angular distribution of the electrons in the peak near $v_e=v_i$ in the electron spectra from He^+-Ar and $\text{H}^{2+}-\text{Ar}$ collisions // J. Phys.B. – 1983. – V. 16, No.10. - P.1017-1021.

162 Varga D., Tökési K., Rajta I. Design of an electrostatic electron spectrometer for simultaneous energy and angular distribution measurements // J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. - 1995. - V.76. – P. 433 – 436.

163 Risley J.S. Design Parameters for the Cylindrical Mirror Energy Analyzer // Rev.Sci. Instr. - 1972. – V. 43, Is.1. - P. 95-103.

164 Varga D., Kádár Á., Kövér L., Redler L. A distorted field cylindrical mirror electron spectrometer // Nucl Instr. Meth.in Physics Research. – 1985. - A238. - P.393-395.

165 Varga D., Kádár I., Ricz S., Végh J., Kövér Á., Sulik B., Berényi D. A spherical mirror-double cylindrical mirror electron spectrometer for simultaneous energy and angular distribution measurements: design, construction and experiences // Nucl. Instr.and Meth. in Physics Research. – 1992. - A313. - P.163-172.

166 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. The combined energy analyzer composed of electrostatic mirror fields // J.of Electron Spectrosc. Relat.Phenom. – 2012. - V.185, Is.11. – P.518-522.

167 Saulebekov A.O. The calculation of charged particles trajectories for one case of electrostatic hexapole cylindrical field // Вестник Национальной инженерной академии. – 2006. - №2 (20). - С.66-71.

168 Саулебеков А.О. Электронно-оптические свойства некоторых

осесимметричных электростатических полей и разработка на их основе энергоанализаторов для исследования поверхности твердого тела: автореф. ... доктора физ.-мат. наук: 01.04.04. -Алматы:ФТИ, 2007. -16 с.

169 Saulebekov A.O., Assylbekova S.N., Kambarova Zh.T. Calculation of the charged particles trajectories in the hexapole cylindrical field //8 International conference handbook «Charged Particle Optics». - Singapore, 2010. - P. 77-78.

170 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O., Kambarova Zh.T. Analyzers of the charged particles fluxes with the hexapole cylindrical field // 8 International conference handbook «Charged Particle Optics». - Singapore, 2010. - P.179-180.

171 Saulebekov A.O., Assylbekova S.N., Kambarova Zh.T., Tussupbekova A.K. Calculation of the charged particles trajectories in the hexapole cylindrical field // Eurasian Physical Technical Journal. – 2011. - V.8, No.2(16). - P. 41-49.

172 Запквара В.В., Редькин В.С. К вопросу о фокусировке пучка заряженных частиц электростатическим зеркалом с цилиндрическим полем // ЖТФ. - 1969. – Т.39. - С.1452-1456.

173 Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т. Моделирование электронно-оптической схемы анализатора с гексапольно-цилиндрическим полем // Тезисы 10 Всеросс. семинара «Проблемы теоретической и прикладной электронной и ионной оптики». – М., 2011.- 55с.

174 Ашимбаева Б.У., Чокин К.Ш., Саулебеков А.О., Камбарова Ж.Т. Моделирование электронно-оптической схемы анализатора с гексапольно-цилиндрическим полем // Прикладная физика. – 2012. - № 2. - С.45-48.

175 Саулебеков А.О., Асылбекова С.Н., Камбарова Ж.Т., Кутум Б.Б. Организация защиты от влияния краевых полей в гексапольно-цилиндрическом анализаторе // Вестник КарГУ. Серия физика. – 2008. - №2 (50). - С. 54 - 59.

176 Трубицын А.А., Толстогузов А.Б., Саулебеков А.О., Суворов Д.В., Тарабрин Д.Ю., Камбарова Ж.Т., Кукса П.И. Проектирование длиннофокусного оже-микроанализатора // Вестник РГРТУ. - 2012. - № 4, Вып.42, Ч.1. – С.54-59.

177 Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Кесіктік электродтарға ие болатын гексапольдік-цилиндрлік анализатордың электронды-оптикалық сұлбасын модельдеу // Вестник КарГУ. Серия Физика. – 2011. - №1 (61). - С. 73-77.

178 Камбарова Ж.Т. Васильева А.Ф., Кутум Б. Мультипольный подход в теории анализирующих электронно-оптических систем // Материалы XIV Межд.конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2007». – М., 2007. – 166 с.

179 Ashimbaeva B.U., Chokin K.Sh., Saulebekov A.O. Focusing properties of a mirror analyzer with hexapole cylindrical field // J. of E.Spect. and Rel. Phen. - 2005.-143 (1).– P.29-32.

180 Саулебеков А.О., Трубицын А.А., Камбарова Ж.Т. Компьютерное моделирование электростатического гексапольно-цилиндрического зеркального энергоанализатора // Вестник КарГУ. Серия физика. – 2011.- №3 (63). - С.37-41.