

ДОБРОКЛОНСКАЯ Марина Сергеевна

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КУЛОНОВСКИХ И
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ В ПЕРЕМЕННЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

1.3.9. – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва—2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, главный научный
сотрудник лаборатории плазмы ОИВТ РАН
Василяк Леонид Михайлович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики
Санкт-Петербургского государственного
университета **Карасев Виктор Юрьевич**

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник,
физического факультета Московского
государственного университета
Бычков Владимир Львович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт электрофизики и
электроэнергетики РАН

Защита состоится ____ декабря 2026 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д
002.110.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Объединенного института высоких температур, по адресу 125412, г. Москва, Ижорская
ул., д. 13, стр. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких
температур: jiht.ru/science/dissert-council/.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба
направлять по адресу: 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, на имя ученого секретаря
диссертационного совета.

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д002.110.02
кандидат физико-математических наук

А. В. Тимофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Экспериментально и численными методами исследована динамика заряженных диэлектрических частиц микронных размеров (5-50 мкм) и области их удержания в линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим потенциалом различных форм (синусоидальная, меандр, асимметричные знакопеременные прямоугольные импульсы), а также с коронным разрядом на электродах. Исследовано влияние плазмы электрического разряда низкого давления на спектр резонансного рассеяния субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной.

Актуальность темы исследования

Квадрупольные электродинамические ловушки являются универсальным инструментом для исследования заряженных частиц в широком диапазоне размеров: от ионов до 100 мкм [1]. Квадрупольные ионные ловушки изначально применялись в условиях вакуума для удержания и лазерного охлаждения частиц, прецизионной спектроскопии, в качестве элемента квантового компьютера. Затем они стали применяться и при атмосферных давлениях газа. Впервые большие стабильные кулоновские структуры заряженных микрочастиц в линейных квадрупольных ловушках в воздухе при атмосферном давлении были получены и исследованы в ОИВТ РАН [1]. Были также продемонстрированы возможные их применения для измерения зарядов микрочастиц, очистки поверхностей и газовых потоков от микрочастиц. В квадрупольных ловушках в ИТМО исследуется нелинейная динамика заряженных микронных частиц в вертикальных квадрупольных ловушках при атмосферных условиях и их применения для бесконтактного определения размеров и заряда микронных частиц по траекториям движения в воздухе.

Исторически на электродах квадрупольных ловушек применяли синусоидальный потенциал, для которого движение частиц в поле ловушки и анализ стабильности траекторий описываются уравнениями Маттье. В случае вакуума и отсутствия силы тяжести применим закон подобия по параметру отношения заряда к массе q/m . В воздухе при атмосферном давлении на микрочастицы действуют сила трения и сила гравитации, поэтому траектории движения частиц микронного размера и удержание в ловушке зависят от размера частиц и массы. В этом случае закон подобия q/m неприменим, возможен только численный расчет и подтверждение численной модели экспериментом. До настоящего времени области удержания с учетом размеров частиц не исследованы. При использовании синусоидального потенциала на движение и области устойчивости частиц в ловушке можно влиять только двумя параметрами: амплитудой и частотой. В настоящее время для квадрупольных фильтров ионов в вакууме (масс-спектрометров) теоретически рассмотрено применение знакопеременных прямоугольных импульсов напряжения, т.к. появляются дополнительные возможности влияния на области устойчивости, связанные с применением асимметричных по длительности или по амплитуде импульсов. Теоретические исследования новых возможностей асимметричного потенциала для ионов сегодня уже начинают подтверждаться экспериментами. Применение прямоугольного симметричного и асимметричного напряжения для удержания микрочастиц в воздухе ранее не проводилось.

Для создания систем фильтрации и перераспределения ЭМ-энергии, антенн, метаматериалов и метаповерхностей применяются резонансные элементы различных типов. Первые метаматериалы были созданы на основе металлического кольца с тонкой щелью. На их основе было создано достаточно много конструкций для микроволновой области, в фильтрах и в антенной технике. Замена металлов диэлектриками позволяет существенно снизить диссипативные потери. В последнее время появились новые направления, ориентированные на полностью диэлектрическую нанофотонику, а также на ТГц и СВЧ диапазоны. В [2] показано, что плоское диэлектрическое кольцо является магнитным диполем на токах смещения и обладает такими же свойствами, как магнитный диполь в виде

металлического кольца с токами проводимости. Диэлектрические кольца можно использовать в конструкциях и схемах, которые уже созданы на основе металлических колец, поэтому исследование их свойств важно для практических применений. Нерешенной проблемой в этой области является возможность включать и выключать резонансную частоту и изменять диаграмму рассеяния ЭМ-волны. В диссертационной работе в качестве такого ключа предложено использовать электрический разряд низкого давления, расположенный в заданных положениях около диэлектрического кольца.

Цель работы

1. Экспериментальные исследования и численные расчеты траекторий, областей удержания и способов управления динамикой заряженных микрочастиц в линейной горизонтальной квадрупольной ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим напряжением синусоидальной и прямоугольной формы, а также с коронным разрядом на электродах.

2. Исследование влияния электрического разряда низкого давления на спектр резонансного рассеяния субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной СВЧ-диапазона.

Цели диссертации были достигнуты решением следующих задач:

1. Модификация экспериментальной установки и расчетной модели применительно к удерживающему потенциалу прямоугольной формы, как в форме меандра, так и асимметричных по длительности импульсов, а также коронного разряда.

2. Экспериментальные исследования и численные расчеты траекторий заряженных микрочастиц и анализ размеров микрочастиц, удерживаемых ловушкой при различных формах напряжения на электродах ловушки, разных размерах и зарядах частиц.

3. Расчет областей удержания микрочастиц в воздухе при атмосферном давлении для разных форм и частот удерживающего напряжения (синусоидальное, меандр, знакопеременные асимметричные прямоугольные импульсы) и разных размеров частиц и экспериментальная проверка результатов численного моделирования.

4. Экспериментальные исследования и численные расчеты траекторий заряженных микрочастиц в линейной ловушке при воздействии внешнего знакопеременного импульсно-периодического электрического поля при изменении его частоты.

5. Исследование влияния плазмы разряда низкого давления на резонансные характеристики и спектр рассеяния субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной СВЧ-диапазона.

Научная новизна работы

1. Впервые экспериментально и численно исследована динамика заряженных микрочастиц в линейной горизонтальной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим напряжением в виде симметричных и асимметричных прямоугольных импульсов в зависимости от их амплитуды и частоты и от зарядов и размеров частиц (5-50 мкм).

2. Обнаружено движение частиц по диагональным траекториям при асимметричных импульсах напряжения, что не наблюдается при синусоидальном напряжении. Предложено такие траектории использовать для диагностики знака заряда диэлектрических частиц.

3. Разработан способ расчетного определения областей удержания заряженных микрочастиц размером 5–50 мкм в воздухе при атмосферном давлении в зависимости от амплитуды удерживающего напряжения и заряда частицы.

4. Рассчитаны и экспериментально подтверждены области удержания заряженных частиц размерами 5-50 мкм в зависимости от амплитуды удерживающего напряжения и заряда частицы для знакопеременных симметричных и асимметричных прямоугольных

импульсов с учетом силы гравитации, силы трения, размера частиц, частоты следования импульсов.

5. Экспериментально обнаружено и численным расчетом подтверждено, что внешним знакопеременным импульсно-периодическим электрическим полем путем изменения его частоты можно как раскачать параметрическую неустойчивость движения частицы с увеличением амплитуды колебаний, так и стабилизировать траекторию движения микрочастиц.

6. Экспериментально исследовано удержание диэлектрических микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах при синусоидальной и прямоугольной формах удерживающего напряжения при различных диаметрах электродов и токах коронного разряда.

7. Экспериментально обнаружен и численно подтвержден эффект подавления амплитуды резонанса и резонансного рассеяния или сдвига резонансной частоты диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной, при включении разряда низкого давления в форме полукольца или цилиндра.

Научная и практическая значимость

Установлены закономерности движения и получены области удержания заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с учетом действия потенциала прямоугольной формы, силы тяжести, вязкого сопротивления среды, внешних электрических полей и коронного разряда, что необходимо для развития моделей удержания в линейных ловушках и для разработки новых устройств для бесконтактного удержания и сепарации частиц. Получены новые способы воздействия на одиночные частицы и кулоновские структуры, предложен метод диагностики заряда частиц.

Эффект подавления амплитуды резонанса и резонансного рассеяния или сдвига резонансной частоты субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной, электрическим разрядом низкого давления может быть использован для переключения резонансных электромагнитных полей диэлектрических колец в фильтрах и резонаторах, антеннах, системах перераспределения энергии, перестраиваемых диэлектрических метаповерхностях, сенсорах и других элементах радиофотоники.

Положения, выносимые на защиту

1. Области удержания частиц 5-50 мкм при напряжении в форме знакопеременных симметричных прямоугольных импульсов смещены в сторону более низких амплитуд и меньших зарядов по сравнению с синусоидальным напряжением и не описываются законом подобия “отношение заряда к массе”, для асимметричных импульсов области удержания сужаются, а траектории частиц лежат на диагоналях квадрупольной линейной ловушки в воздухе, чего не наблюдается для синусоидального напряжения.

2. Внешнее знакопеременное электрическое поле прямоугольной формы с частотой ниже частоты удерживающего синусоидального напряжения ловушки вызывает параметрическую раскачку неустойчивости движения заряженных частиц, а при частотах выше частоты напряжения ловушки стабилизирует движение частиц, что позволяет управлять их устойчивостью без изменения параметров ловушки.

3. В ловушке с коронным разрядом на линейных электродах увеличение диаметра электродов от 63 до 200 мкм приводит к увеличению диапазона размеров удерживаемых частиц от 3-6 мкм до 3-25 мкм и его смещению в область больших размеров вследствие увеличения напряжения на коронном разряде.

4. Включение разряда низкого давления в виде полукольца над диэлектрическим кольцом приводит к подавлению резонанса магнитного диполя субволнового

диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской электромагнитной волной в СВЧ-диапазоне.

Степень достоверности результатов и апробация работы

Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений базируются на использовании современных высокоточных средств измерений и диагностики, применении апробированных методик проведения исследований, на согласованности расчётных предсказаний с результатами экспериментов, на статистическом подтверждении экспериментально полученных результатов, а также на согласованности расчетов и экспериментов с ранее выполненными исследованиями в рамках их пересечений.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Международные научные семинары «Non-Ideal Plasma Physics» (г. Москва, Россия) 2022-2025.
- International Conferences on Equations of State for Matter (Эльбрус, Россия) 2022-2026.
- International Workshops «Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation» (г. Москва, Россия) 2024-2026.
- Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия) 2023-2026.
- II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (г. Казань, Россия) 2022.
- XIII Всероссийская конференция ФЭ-2024 (г. Махачкала, Россия) 2024.
- Международная конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение» (г. Москва, Россия) 2024.
- Всероссийская молодежная конференция по управляемому термоядерному синтезу, плазменным технологиям и высокотехнологичной медицине (ВМКТ-2025) (г. Троицк, Россия) 2025.
- XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2026» (г. Москва, Россия) 2026.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

Личный вклад автора

Автором работы модифицированы компьютерные программы и выполнены все расчеты. Основные результаты, полученные из экспериментов и расчетов, которые представлены в диссертации, получены непосредственно автором или при его определяющем личном участии. Автор работы внес основной вклад в подготовку и проведение экспериментов и в обработку полученных результатов, принимал участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке рукописей статей. Все доклады на конференциях подготовлены и представлены лично автором.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 166 страниц текста, включая 13 таблиц, 133 рисунка. Список цитируемой литературы - 117 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика диссертации, обосновывается актуальность тематики, формулируются цель исследования и основные задачи. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях автора и структуре диссертации.

В **Главе 1** сделан обзор исследований режимов работы линейных квадрупольных ловушек в вакууме и воздухе. Ловушку образуют четыре цилиндрических электрода, оси которых расположены в углах квадрата. На диагональные электроды подается переменное синусоидальное напряжение в противоположной фазе. Движение заряженной частицы в параболическом потенциале ловушки в вакууме описывается системой уравнений Матье, учитывающей только электрические силы ловушки, без гравитации или с её компенсацией постоянным электрическим полем, поэтому безразмерные параметры зависят исключительно от отношения заряда частицы к её массе.

В воздухе и для частиц микронных размеров необходимо учитывать силу Стокса и гравитацию, пропорциональные радиусу и кубу радиуса частицы соответственно, поэтому закон подобия неприменим, и расчет границ устойчивости удержания необходимо делать для каждого значения радиуса.

Следующим шагом изменения границ устойчивости может быть использование прямоугольной формы удерживающего напряжения, которая, в отличие от синусоидальной, позволяет менять не только амплитуду и частоту, но также длительность и амплитуду полуволн. Появились теоретические работы с анализом импульсного питания в квадрупольных масс-спектрометрах (фильтрах), предсказывающие новые области устойчивости для частиц в вакууме. Линейная квадрупольная ловушка с потенциалом в виде импульсно-периодических знакопеременных прямоугольных симметричных и асимметричных импульсов для удержания заряженных микрочастиц в воздухе будет обладать дополнительными параметрами воздействия на движение отдельных частиц и динамику кулоновских структур в воздухе, однако экспериментальных исследований или численных расчетов ранее не проводилось.

Сделан обзор современных исследований и приложений диэлектрических метаземелентов, и о преимуществах кольцевых диэлектрических резонаторов как идеальных магнитных диполей. Для создания метаповерхностей вначале использовали металлические кольца с разрезом, которые являются магнитным диполем, свойства которых хорошо известны и резонансная частота может быть рассчитана на основе емкости и самоиндуктивности. На основе металлических колец было создано достаточно много конструкций для микроволновой области. Однако даже в простых диэлектрических телах, например в сфере, диске, цилиндре, электромагнитная волна инициирует много различных типов резонансов, частоты которых могут совпадать, поэтому расчеты резонансных частот и полей рассеяния для диэлектрических тел становятся сложной задачей. Поэтому важной становится задача создания диэлектрического магнитного диполя с основной резонансной частотой. Кольцевые диэлектрические элементы представляют большой интерес и как одиночные резонаторы, и в структурах из нескольких колец. Важной и пока не решенной задачей является создание способа включения и выключения резонанса и перераспределения излучения в диэлектрических элементах.

В **Главе 2** описаны экспериментальные установки и методики расчетов.

В **разделе 2.1** описана экспериментальная установка для исследования динамики заряженных микрочастиц в горизонтальной линейной квадрупольной ловушке (Рис. 1).

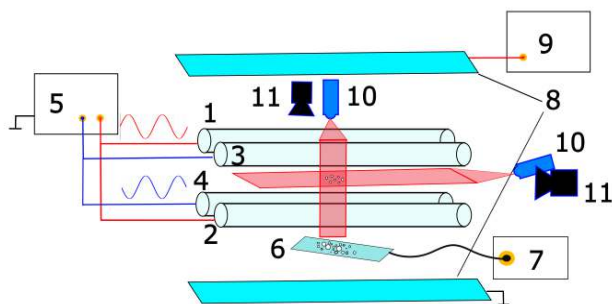


Рис.1. Схема установки с линейной ловушкой. (1–4) - электроды ловушки, 5 - источник переменного напряжения, 6 - металлическая пластина для зарядки частиц, (7, 9) - источники постоянного напряжения, 8 - внешние металлические пластины для создания дополнительного электрического поля, 10 - лазер, 11 - видеокамера.

В лаборатории был создан генератор высоковольтных прямоугольных импульсов. Частицы оксида алюминия заряжались индукционно на металлической пластине, оценка заряда проводилась на основе модели поляризации диэлектрической сферы в однородном электрическом поле. Движение микрочастиц рассчитывали численным решением уравнения Ланжевена с учетом сил электродинамической ловушки, силы сопротивления воздуха по формуле Стокса, кулоновского взаимодействия, силы тяжести и случайных соударений с молекулами газа F_b . Электрическое поле ловушки предварительно рассчитывали в COMSOL. Частицы в расчете представлены сферами.

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i, t) - 6\pi\eta \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + \sum_{j \neq i} k \frac{q_j q_i}{r_{ji}^2} \frac{\mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}} + m_i \mathbf{g} + (\mathbf{F}_b)_i(t)$$

В разделе 2.2 описана экспериментальная установка для исследования спектров резонансного рассеяния субволновым диэлектрическим кольцом, возбуждаемым плоской ЭМ-волной. Измерения проводились спектроанализатором Agilent E5071C ENA Network Analyzer, магнитные поля измерялись датчиком Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром кольца детектора 3,7 мм. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программы CST Microwave Studio.

В Главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования динамики заряженных микрочастиц оксида алюминия в воздухе в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при напряжении синусоидальной формы и в форме знакопеременных симметричных и асимметричных прямоугольных импульсов, а также при дополнительном воздействии внешнего переменного электрического поля прямоугольной формы. При расчетах в этой главе размер частицы выбран 20 мкм. В начальный момент времени частица помещалась в центре ловушки, в точке с координатами (0,0), начальная скорость частицы принималась равной нулю. Параметры напряжения на ловушке для расчета соответствуют схеме эксперимента.

В разделе 3.1 представлены расчетные и экспериментально полученные траектории микрочастиц 20 мкм с разными зарядами при синусоидальном напряжении. На Рис. 2 показаны 5 различных траекторий: три траектории, при которых частица остается в ловушке длительное время, и две, при которых частица покидает ловушку. На Рис. 2,а показана устойчивая траектория, при которой микрочастица с зарядом 98 000е быстро (за 3-4 периода) переходит к движению в ограниченной области пространства ловушки длиной около 1 мм, через 1.5 периода ее траектория становится повторяющейся, а среднее положение – вблизи оси ловушки. В эксперименте одиночная частица, движущаяся по такой траектории, часами оставалась в ловушке. На Рис. 2,б – траектория частицы с увеличенным зарядом 135 000 е и, соответственно, увеличенной кинетической энергией. Прежде чем достигнуть ограниченной области удержания, частица теряет часть энергии, двигаясь по сужающейся траектории, переходя из области сильного электрического поля в область слабого.

При увеличении заряда до 145 000 е частица двигается по траектории в виде четырехугольной кривой на границе устойчивости (Рис.2,в). При дальнейшем увеличении заряда до 149 000 е траектория становится неустойчивой – каждый следующий виток траектории расположен дальше от предыдущего, что приводит к вылету частицы или столкновению с электродом (Рис. 2,г). На Рис. 2,д показана траектория падения частицы из ловушки под действием силы тяжести при уменьшении заряда до 40 000 е, т.к. электрических сил ловушки недостаточно для удержания частицы. Все рассчитанные типы траекторий получены экспериментально (Рис. 3). Рассмотрено влияние радиуса частицы при одинаковом отношении заряда к массе q/m . Показано, что границы устойчивости для заряженных частиц в электродинамических ловушках в воздухе при атмосферном давлении зависят не только от отношения q/m , но и от размеров микрочастиц.

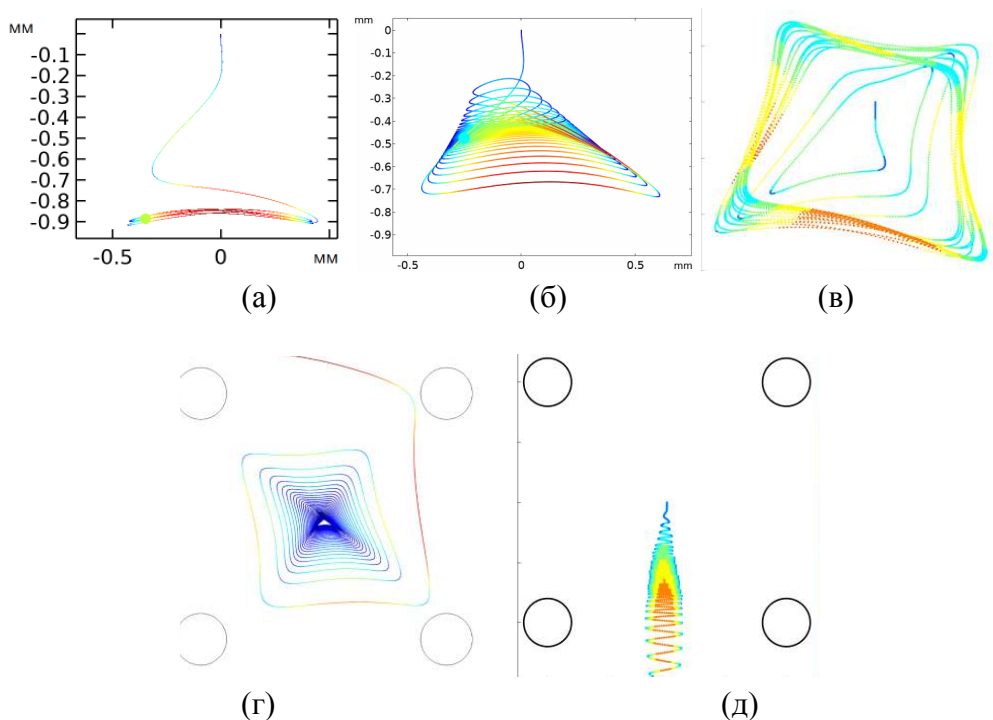


Рис. 2. Рассчитанные траектории для частицы 20 мкм при синусоидальном напряжении и различных зарядах частицы. (а) - (в) – устойчивые траектории, (г), (д) – неустойчивые.

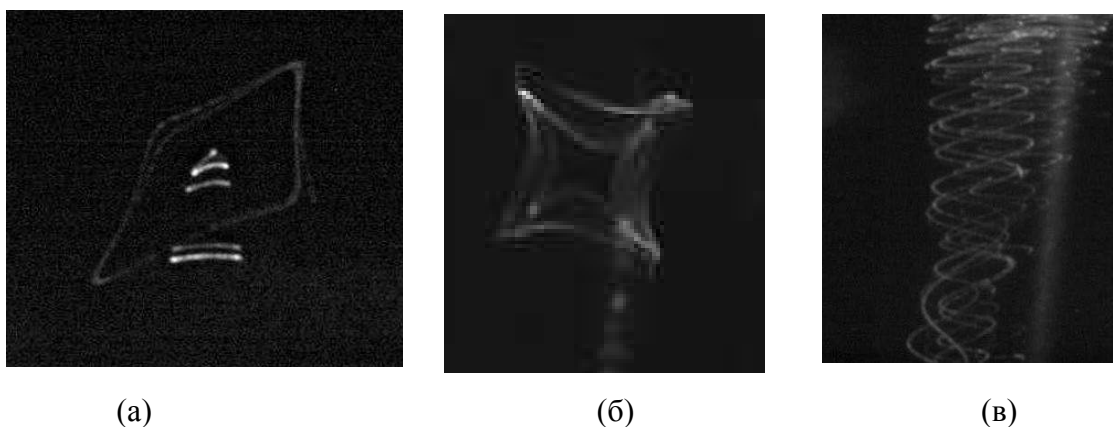


Рис. 3. Экспериментально полученные траектории: (а) – устойчивые, (б)- вылет, (в)- падение.

В разделе 3.2 представлены расчёты траекторий при удерживающем напряжении, прямоугольной симметричной формы (меандр). На Рис. 4,а-б показаны устойчивые траектории, причем траектория на Рис.4,а получена при значении заряда 40 000 е, при котором в случае синусоидального напряжения частица падает из ловушки (Рис. 2,д). На Рис.4,в показана неустойчивая траектория частицы с зарядом 135 000 е. Для синусоидального напряжения при таком заряде развивается сужающаяся устойчивая траектория. Траектория падения на Рис.4,г при прямоугольном напряжении под действием силы тяжести развивается при меньших значениях заряда по сравнению с синусоидальным напряжением. Для последней траектории отмечено нетипичное движение при падении при синусоидальном напряжении – ускорение на краях горизонтальных участков траектории, вызванное большей длительностью действия напряжения с максимальной амплитудой. Основное отличие при переходе от синусоидального напряжения к прямоугольному заключается в том, что для достижения одинакового характера движения при прямоугольном напряжении требуется меньший заряд, чем при синусоидальном напряжении.

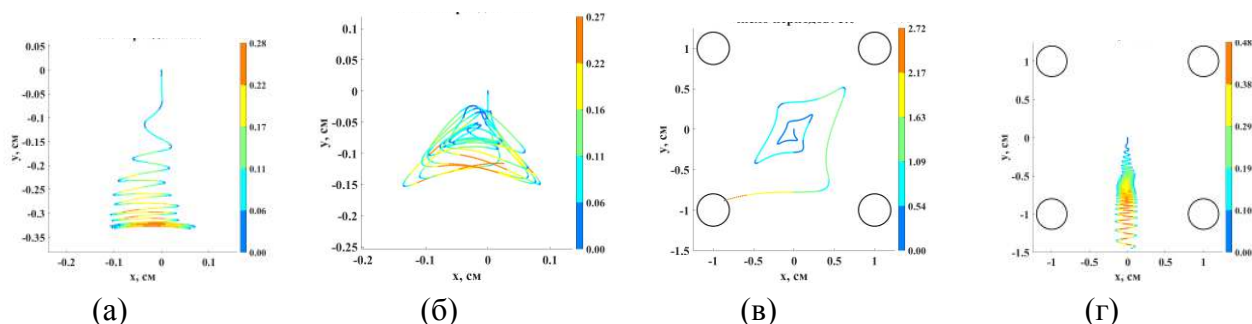


Рис. 4. Рассчитанные траектории при различных зарядах при прямоугольном напряжении.

В разделе 3.3 рассмотрена динамика частиц при изменении амплитуды синусоидального и прямоугольного напряжения. При одинаковых значениях заряда с уменьшением амплитуды синусоидального и прямоугольного напряжения наблюдаем разную динамику. При прямоугольном напряжении частица диаметром 35 мкм с зарядом 250 000 е удерживается в ловушке и движется по горизонтальной траектории, аналогично Рис. 4,а, тогда как при синусоидальной форме напряжения частица покидает ловушку по траектории падения, аналогичной Рис.2,д. Прямоугольное напряжение обеспечивает удержание частицы при меньших амплитудах по сравнению с синусоидальным. Смоделирована возможность стабилизации частицы сменой формы напряжения с синусоидальной на прямоугольную.

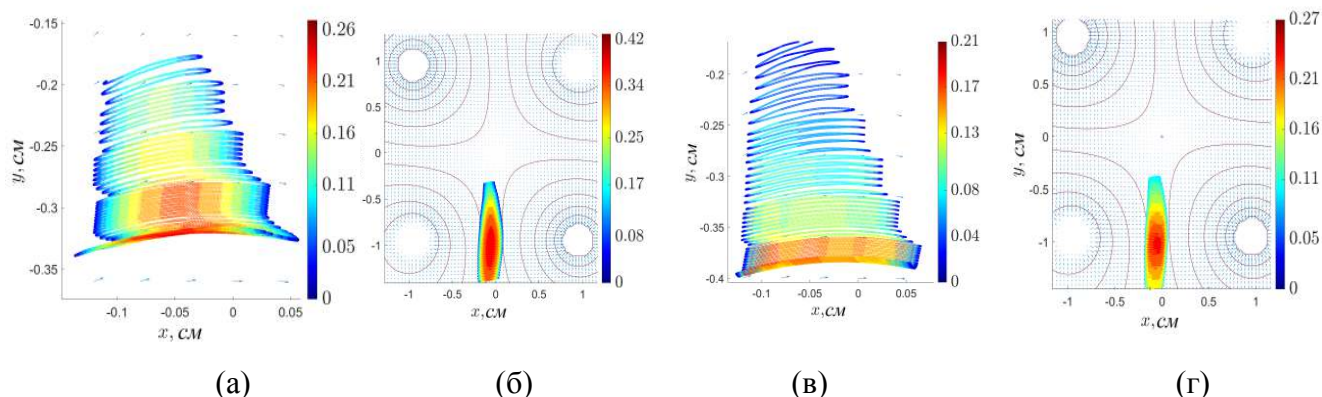


Рис. 5. Рассчитанные участки траекторий при уменьшении амплитуды напряжения: синус: (а) с 4 до 3 кВ; (б) с 3 до 2 кВ; прямоугольного: (в) с 3 до 2 кВ; (г) с 2 до 1.2 кВ.

На Рис.5,а-б показаны участки траекторий при последовательном уменьшении амплитуды синусоидального напряжения: с 4 до 3 кВ (Рис. 5,а), где частица снижается относительно предыдущей области устойчивых колебаний, но все еще выходит на устойчивую горизонтальную траекторию; при снижении с 3 до 2 кВ сила тяжести превышает электрические силы и частица выпадает (Рис. 5,б). На Рис. 5,в-г показаны участки траектории после уменьшения амплитуды прямоугольного напряжения: с 3 до 2 кВ (Рис.5,в), частица сохраняет устойчивое движение внутри ловушки, но размах колебаний увеличился. При дальнейшем уменьшении амплитуды напряжения с 2 до 1.2 кВ частица теряет устойчивость и покидает ловушку (Рис. 5,г). Нижняя граница удержания для прямоугольного напряжения оказывается существенно ниже, чем для синуса.

В разделе 3.4 рассчитаны и экспериментально получены траектории при асимметричном прямоугольном напряжении. Асимметрия импульса определяется коэффициентом заполнения K_p , равным отношению длительности положительной полуволны к длительности периода (в процентах). В асимметричном поле траектории принципиально отличаются и расположены на диагоналях квадрата поперечного сечения ловушки. На Рис.6,а и Рис. 6,в показаны экспериментальные траектории при $K_p = 40\%$ и $K_p = 60\%$ соответственно (амплитуда 5 кВ, частота 50 Гц). Соответствующие расчетные траектории показаны на Рис. 6,б и Рис.6,г для частицы 20 мкм с зарядом 40 000 е, при

которых ранее достигались устойчивые колебания. Движение по диагонали объясняется тем, что частица движется между электродами, на которых максимальна длительность полуволны с полярностью, противоположной знаку заряда на самой частице. Показано, что Кр является дополнительным параметром управления траекториями заряженных микрочастиц.

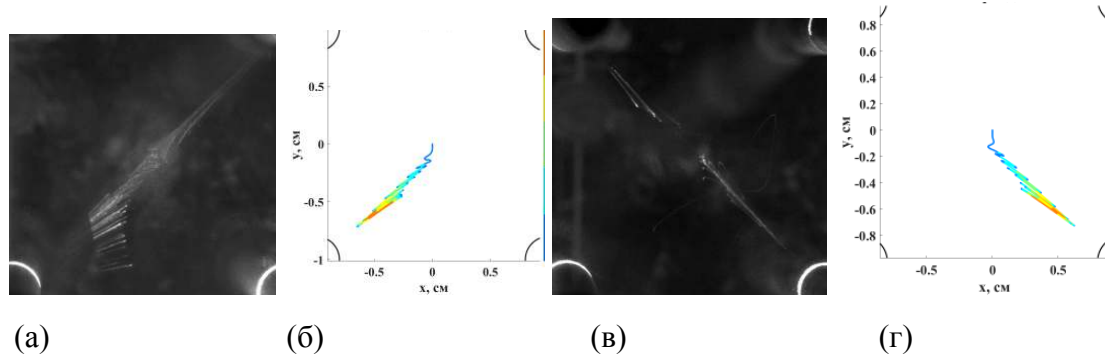


Рис. 6. Траектории частиц. Кр=40% : (а) - эксперимент; (б) - расчет; Кр = 60%: (в) – эксперимент, (г) - расчет.

В разделе 3.5 для прямоугольного асимметричного напряжения рассчитаны и измерены траектории для различных знаков заряда (Рис. 7). Установлено, что траектории

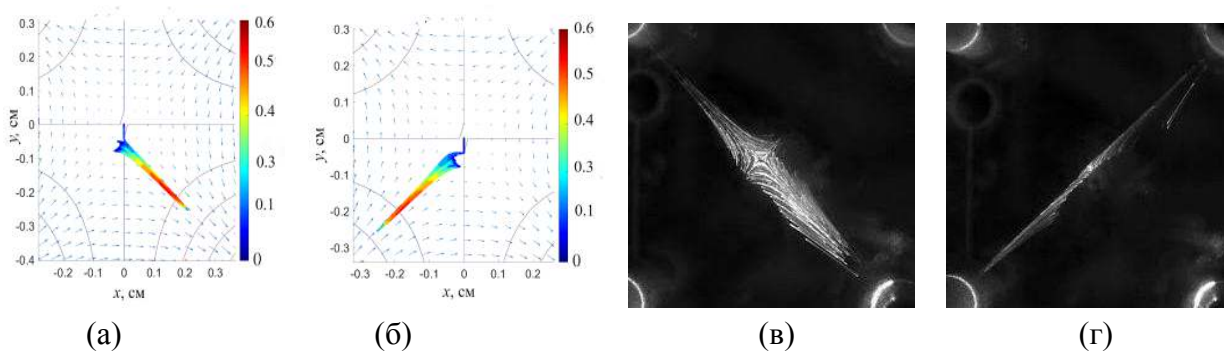


Рис. 7. Траектории частиц при Кр = 40 % и разных знаках зарядов. Положительный заряд – (а, в), отрицательный – (б, г). Расчет – (а, б), эксперимент – (в, г).

развиваются вдоль диагонали с более длительным действием полярности, противоположной знаку заряда частицы. На Рис. 7,а-б при Кр = 40 % показаны расчетные траектории для положительно и отрицательно заряженных частиц, а экспериментальные — на Рис. 7,в-г. Для положительно заряженной частицы траектория развивается вдоль одной диагонали, тогда как для отрицательно заряженной частицы движение происходит вдоль другой диагонали, перпендикулярной первой. Обнаруженный эффект можно использовать для диагностики знака заряда на частицах.

В разделе 3.6 рассмотрено влияние внешнего прямоугольного знакопеременного электрического поля на динамику микрочастиц в ловушке с синусоидальным удерживающим напряжением. Эксперимент и численный расчет показали, что, меняя частоту внешнего поля, можно стабилизировать неустойчивую траекторию частицы или, наоборот, раскачать неустойчивость из изначально устойчивой траектории. Квадрупольная ловушка помещалась между двумя металлическими пластинами, расположенными на расстоянии 10 см друг от друга. Нижняя пластина заземлена, а на верхнюю подавалось прямоугольное знакопеременное напряжение амплитудой 3 кВ различной частоты. На Рис. 8 показаны рассчитанные траектории частицы 20 мкм с зарядом 98 000 е при амплитуде синусоидального удерживающего напряжения 5 кВ и частоте 50 Гц в отсутствие внешнего поля на Рис.8,а; при приложении внешнего прямоугольного поля с частотой 27 Гц развивается неустойчивая траектория с вылетом на электрод (Рис.8,б); при увеличении

частоты внешнего поля до 77 Гц траектория стабилизируется (Рис.8,в). Для частицы с зарядом 145 000 е траектория без внешнего поля неустойчива, однако внешнее знакопеременное поле стабилизирует движение частицы при частоте больше 50 Гц. На Рис.9 приведены экспериментальные траектории: Рис.9,а – начальная устойчивая траектория без внешнего поля, Рис.9,б - раскачка неустойчивости при частоте внешнего поля 27 Гц; стабилизация движения при повышении частоты (до 177 Гц).

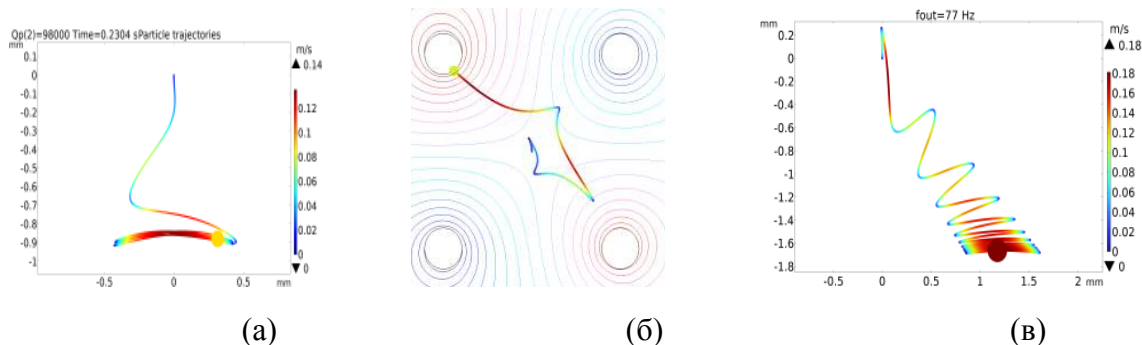


Рис. 8. Траектория частицы с зарядом 98000 е при влиянии внешнего электрического поля. Расчет. (а) – внешнего поля нет; (б) – частота 27 Гц; (в) - 77 Гц.

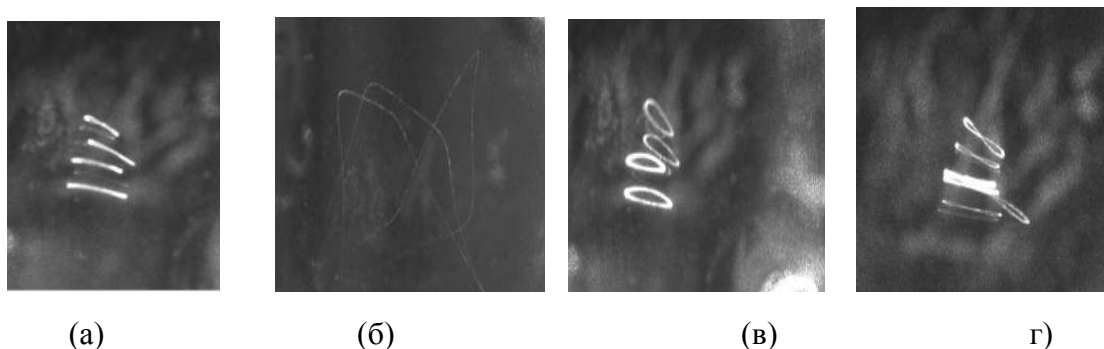


Рис. 9. Траектории с внешним полем: (а) – без поля, (б) – 27 Гц; (в) – 50 Гц; (г) – 170 Гц.

Колебания с дополнительным периодическим воздействием являются параметрическими, они описываются уравнением Матье, и в зависимости от частоты и амплитуды воздействия для них существуют области неустойчивости и устойчивости. Ранее стабилизация кулоновских структур микрочастиц в плазме низкого давления внешним электрическим полем была получена в ОИВТ РАН [3].

В разделе 3.7 исследовано влияние внешнего постоянного электрического поля различной полярности на положение кулоновской системы в ловушке при синусоидальном удерживающем напряжении и возможность компенсации силы тяжести. На Рис. 10,а представлены фрагменты устойчивой кулоновской системы без внешнего поля. При положительном напряжении на внешних пластинах + 6 кВ структура заряженных микрочастиц смещается вверх (Рис. 10,б), верхние слои частиц облака в области более высокого электрического поля ловушки переходят в состояние, близкое к неустойчивому, скорость частиц возрастает по мере приближения к верхним электродам ловушки. После снятия напряжения структура возвращается в исходное положение. При отрицательном напряжении –10 кВ структура из заряженных микрочастиц смещается вниз (Рис. 10,в), часть частиц покидает ловушку, скорость оставшихся частиц уменьшается и повышается устойчивость структуры. Расчеты подтверждают эксперимент.

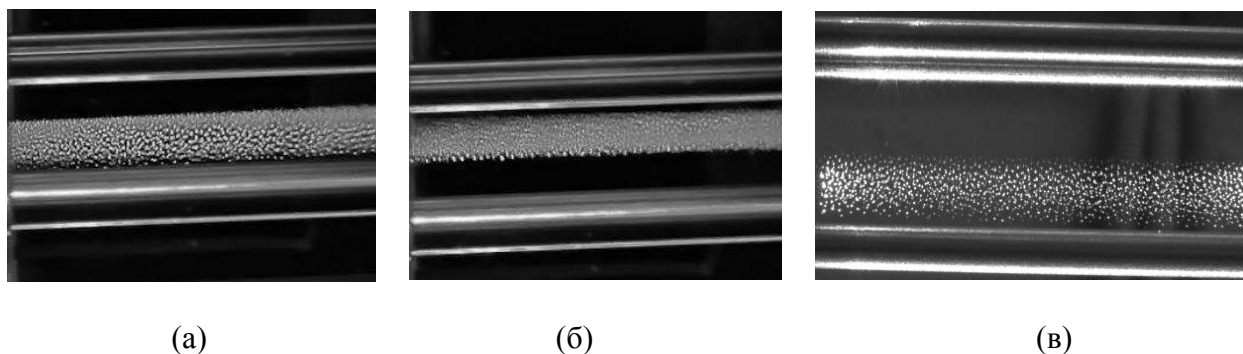


Рис. 10. Фрагменты кулоновской системы: (а) - без внешнего поля; (б) - при напряжении на внешних пластинах + 6 кВ (смещение вверх); (в) - при напряжении –10 кВ (смещение вниз).

В разделе 3.8 представлены результаты удержания изначально незаряженных микронных частиц в квадрупольной ловушке длиной 11 см с межэлектродным расстоянием 1 см с коронным разрядом на электродах. Пороговое напряжение зажигания: 2.6 кВ для электродов диаметром 63 мкм и 120 мкм и 4.2 кВ для 200 мкм. Экспериментально получено и подтверждено расчетом, что удерживаются микрочастицы с ограниченным диапазоном размеров при переменном синусоидальном и прямоугольном напряжении на электродах. Частицы удерживались и в узком диапазоне токов коронного разряда 15–70 мкА. Для электродов диаметром 63 мкм распределение удерживаемых частиц является близким к монодисперсному: основная фракция сосредоточена в области 3–6 мкм, средний размер частиц 4 мкм. При диаметре электродов 120 мкм диапазон размеров расширяется до 3-15 мкм, средний размер частиц 8.5 мкм, при диаметре электродов 200 мкм до 3–25 мкм, средний размер частиц 8 мкм, в этих распределениях появляются более крупные удерживаемые частицы 40-60 мкм. На изображении кулоновской структуры (Рис. 11) видно, что в области слабого поля частицы неустойчивы. При расчетах распределение электрического поля в ловушке с коронным разрядом предполагалось аналогичным полю короны в геометрии провод-плоскость. Расчеты подтвердили удержание мелкой фракции частиц.

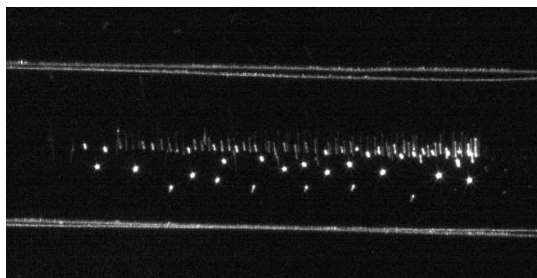


Рис. 11. Фрагмент кулоновской структуры в ловушке с коронным разрядом. Диаметр электродов 63 мкм. Амплитуда напряжения 3,2 кВ, частота 50 Гц, ток разряда 30 мкА.

В Главе 4 представлены результаты численных расчетов границ областей удержания заряженных микрочастиц при синусоидальном и знакопеременном прямоугольном напряжении ловушки и их подтверждение экспериментом.

В разделах 4.1 и 4.2 вводятся пояснения к расчетам областей удержания и приведены рассчитанные области. На Рис. 12 показан пример расчета области удержания для синусоидального напряжения и для разных точек на границах приведены траектории (аналогичные показанным на Рис.2). Устойчивая траектория, развивающаяся по горизонтальной линии для частицы с зарядом 98 000 е, находится внутри области (в левом верхнем углу рисунка). Траектории падения и вылета – за границами области. Размеры частиц в расчетах соответствуют размерам исходной смеси: 5-50 мкм. Для каждой пары параметров “размер частицы - заряд” вычислялась динамика частицы в ловушке с одной из

амплитуд удерживающего напряжения из диапазона и фиксированной частотой. Если частица находилась в ловушке в течение заданного числа периодов переменного удерживающего напряжения, то она считается удерживаемой и параметры ее удержания включаются в итоговые области. Визуализация траекторий подтверждала корректность расчета областей.

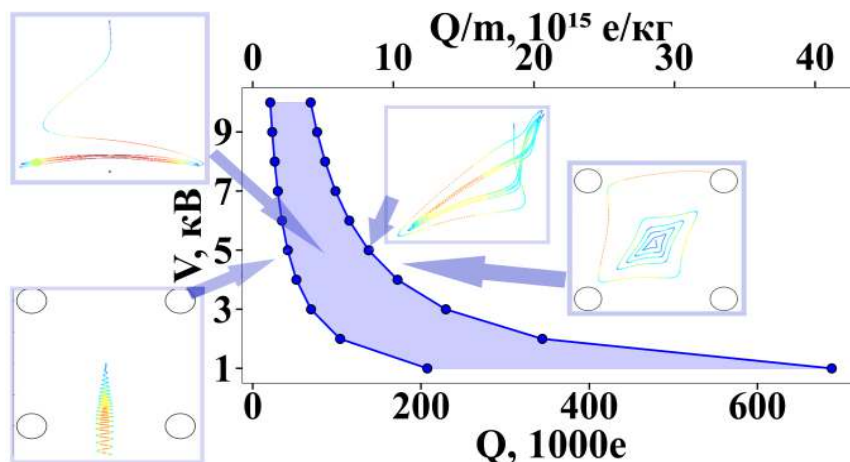


Рис. 12. Область удержания микрочастицы 20 мкм при синусоидальном напряжении.

Разработан алгоритм бинарного поиска границ удержания для сокращения времени расчета. Учтено влияние времени расчета на точность границ удержания. Установлено, что длительность моделирования критически важна для определения областей удержания легких частиц малого диаметра (5 мкм), где недостаточное время расчета приводит к существенному искажению границ, что показано на Рис.13, для крупных частиц (20-50 мкм) влияние времени расчета на точность результатов пренебрежимо мало.

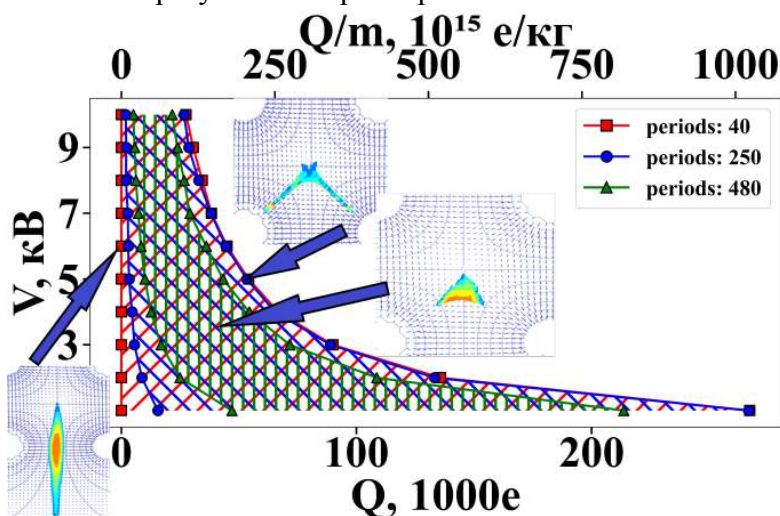


Рис. 13. Области удержания микрочастицы 5 мкм для разных времен расчета: красная область - 40 периодов; синяя - 240 периодов; зеленая - 480 периодов.

Проверено влияние начального положения и скорости на границы областей удержания. Построены области при начальном положении частицы в центре и со смещением 350 мкм ниже центра, в области слабого электрического поля ловушки с нулевой начальной скоростью. В значительной степени изменение начального положения повлияло на правую границу для частицы размером 5 мкм, расширив её на 30%. Для частиц диаметром 20 – 50 мкм смещение начального положения не изменяет общий вид области удержания, что позволяет использовать меньшее число периодов расчета.

Рассчитаны области удержания для трех вариантов начальных условий: нулевая скорость, скорость 0.1 м/с, направленная вертикально вниз, вдоль направления действия силы

тяжести, и скорость 0.1 м/с в горизонтальном направлении, вправо. Скорость, направленная вниз, могла ускорить выпадение частицы, горизонтальная скорость в основном изменяла начальный участок траектории. Расчёты показали, что начальное положение и начальная скорость не влияют на область удержания частиц из исследуемого диапазона.

В разделе 4.3 рассмотрено влияние размера микрочастиц (5, 10, 20, 35 и 50 мкм) на области устойчивого удержания при синусоидальной форме напряжения. При одинаковом отношении заряда к массе q/m устойчивое удержание реализуется только для определенного диапазона размеров частиц. На Рис.14,а показано, что с увеличением диаметра частиц области удержания смещаются в сторону больших зарядов и расширяется диапазон абсолютных значений заряда, при которых возможно устойчивое движение. Для всех диаметров с увеличением амплитуды напряжения область устойчивости сужается и смещается в сторону меньших зарядов. Наиболее широкий диапазон зарядов, соответствующий также их наибольшим значениям, наблюдается при амплитуде удерживающего напряжения 1 кВ. Эксперимент подтвердил, что при снижении изначально высокого напряжения – крупные частицы выпадают первыми, как показано на Рис.14,б. Мелкие частицы удерживаются при малых напряжениях Рис.14,в.

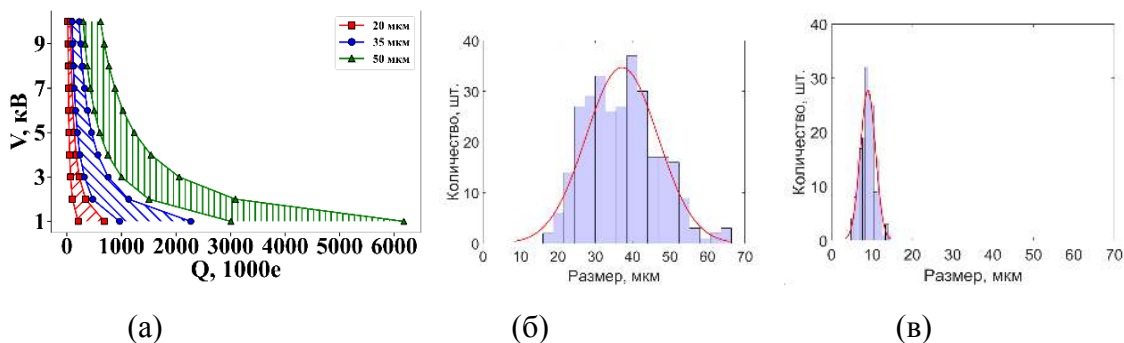


Рис. 14. (а) - Области удержания при синусоидальном напряжении для 20, 35 и 50 мкм; экспериментальные распределения по размеру частиц при снижении амплитуды: (б) - с 8 до 6 кВ; (в) - с 2 до 0 кВ.

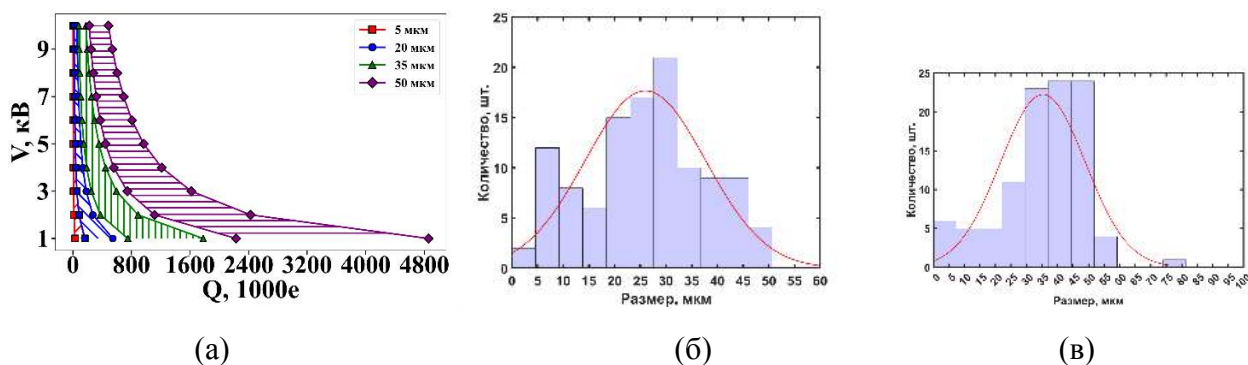


Рис. 15. (а) - Области удержания микрочастиц при прямоугольном напряжении 5-50 мкм; распределения по размеру частиц при амплитуде: (б) - 2кВ; (в) - 7кВ.

На Рис.15,а показаны рассчитанные области удержания для размеров 5 -50 мкм при прямоугольном напряжении. Внешний вид и расположение областей схожи с областями при синусоидальном. Эксперимент на Рис.15,б-в подтвердил лучшее удержание частиц 5 мкм при низком напряжении 2 кВ и частиц размерами 35-50 мкм при высоком напряжении 7 кВ.

В разделе 4.4 проведено сравнение областей удержания микрочастиц 5–50 мкм при синусоидальной и прямоугольной (меандр) формах напряжения с частотой 50 Гц. Показано, что области удержания для двух форм напряжения имеют сходный характер зависимости от амплитуды напряжения, однако при прямоугольном напряжении они смещены в сторону

меньших зарядов, а ширина диапазона зарядов уменьшается в среднем на 15–20 %. На Рис.16 показаны области удержания частицы 50 мкм при синусоидальном (красная область) и прямоугольном (синяя) напряжениях. При одинаковых частоте, амплитуде напряжения и размере частицы прямоугольное напряжение обеспечивает удержание частиц с меньшими значениями заряда и q/m по сравнению с синусоидальным.

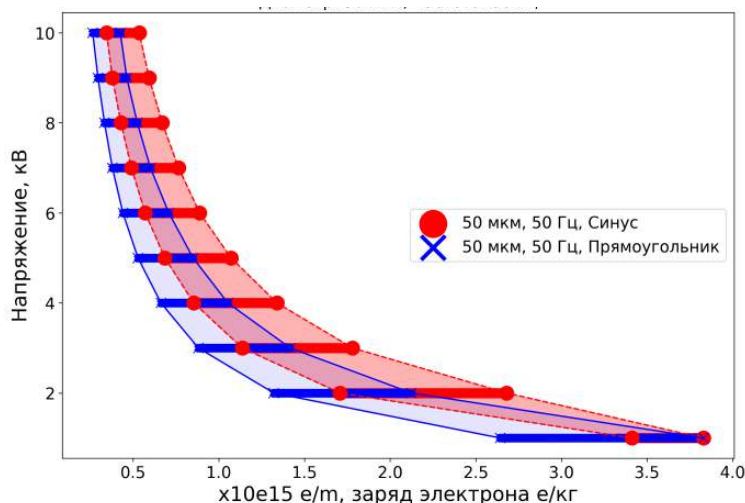


Рис. 16. Область удержания для частиц 50 мкм для разных форм напряжения.

В разделе 4.5 представлены результаты расчетов и экспериментов влияния частоты меандра на области устойчивого удержания. С увеличением частоты области удержания для всех рассмотренных размеров частиц расширяются и смещаются в сторону больших значений заряда, тогда как уменьшение частоты приводит к их сужению и смещению в сторону меньших зарядов (Рис.17). Для частиц 20 и 50 мкм области при частотах 25 и 100 Гц на Рис.17,а-б, практически не пересекаются, что указывает на возможность частотной сепарации частиц по размеру и заряду.

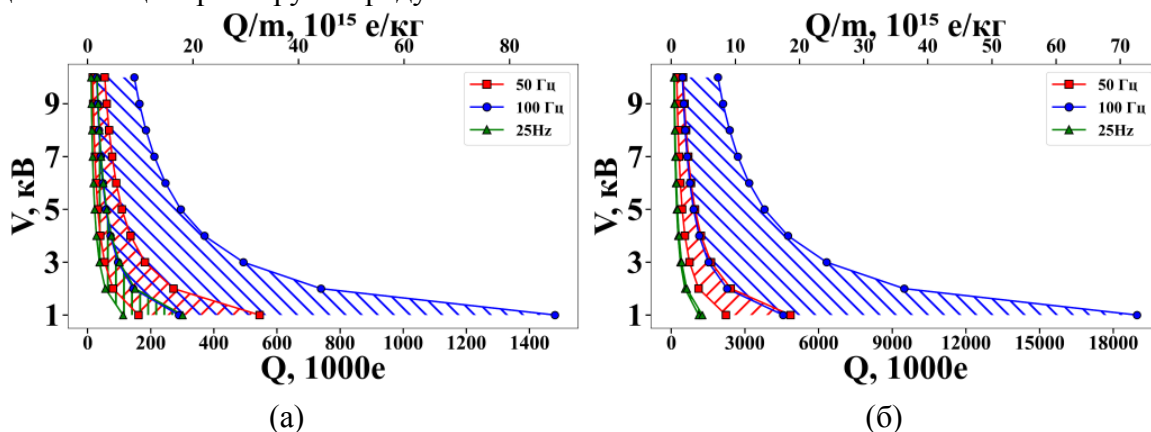


Рис.17. Рассчитанные области удержания частиц (а) - 20 мкм и (б) - 50 мкм при различных частотах меандра.

Расчеты подтверждены экспериментально: частицы, первоначально устойчиво удерживаемые в ловушке при частоте меандра 50 Гц, покидали область удержания при увеличении частоты меандра до 100 Гц (Рис.18).

В разделе 4.6 представлено влияние асимметрии знакопеременного прямоугольного удерживающего напряжения с частотой 50 Гц на области устойчивого удержания микрочастиц 5–50 мкм. С увеличением асимметрии напряжения области удержания сужаются и смещаются в сторону больших значений заряда, причем характер этих изменений существенно зависит от размера частиц. На Рис.19,а показаны области удержания для

размера 10 мкм при $K_p = 50-35\%$ и на Рис.19,б для 20 мкм при $K_p = 50-30\%$, т.е. для наиболее широкого диапазона K_p .

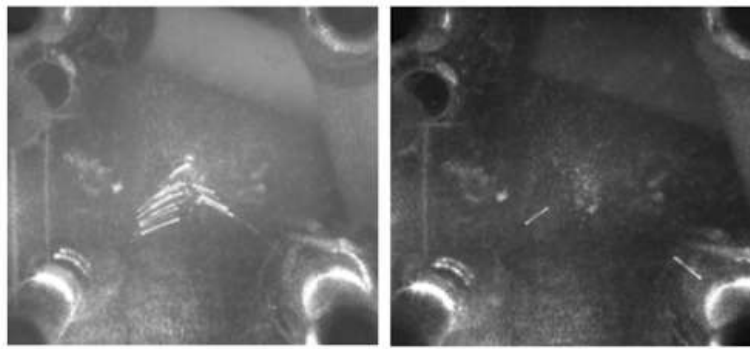


Рис.18. Вид ловушки с торца при прямоугольном удерживающем напряжении (меандр) амплитудой 4 кВ: (слева) - частота 50 Гц; (справа) - частота 100 Гц.

Частицы размером 5 мкм при рассмотренных асимметричных режимах не удерживаются. Области удержания становятся меньше с увеличением асимметрии: для 10 мкм области находятся внутри области для симметричного поля $K_p = 50\%$, для 20 мкм и больше области сдвигаются вдоль оси увеличения заряда на частице.

Эксперимент подтверждает выводы расчетов: на Рис.20,а – распределение по размеру частиц, осажденных при $K_p=50\%$, диапазон размеров 2-80 мкм. На Рис.20,б - распределение частиц размером 2-10 мкм, осажденных при изменении K_p с 50 до 45%, подтверждают последовательное сужение областей удержания и чувствительность мелких частиц 5 мкм к асимметрии удерживающего напряжения. Таким образом, изменение длительности положительной и отрицательной полуволн прямоугольного напряжения может использоваться как дополнительный параметр управления удержанием и селективного выделения частиц определенного размерного диапазона.

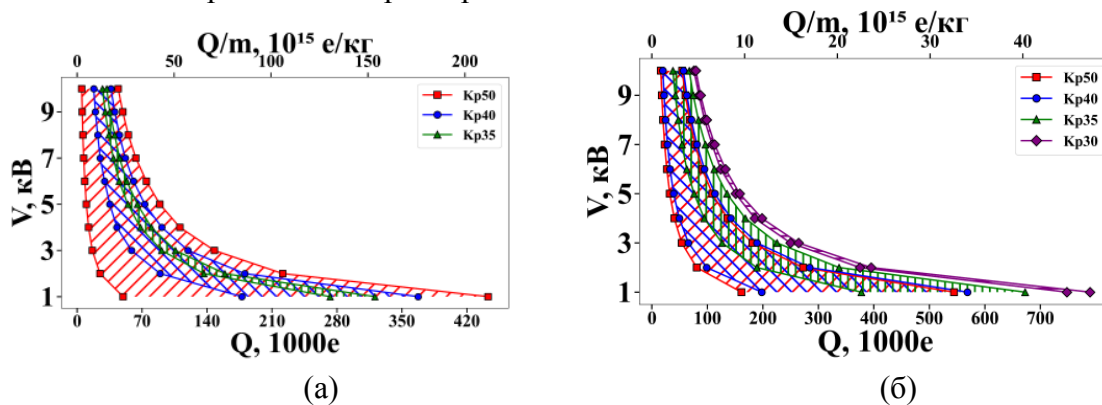


Рис. 19. Область удержания микрочастиц 10 мкм (а) и 20 мкм (б) при различном K_p .

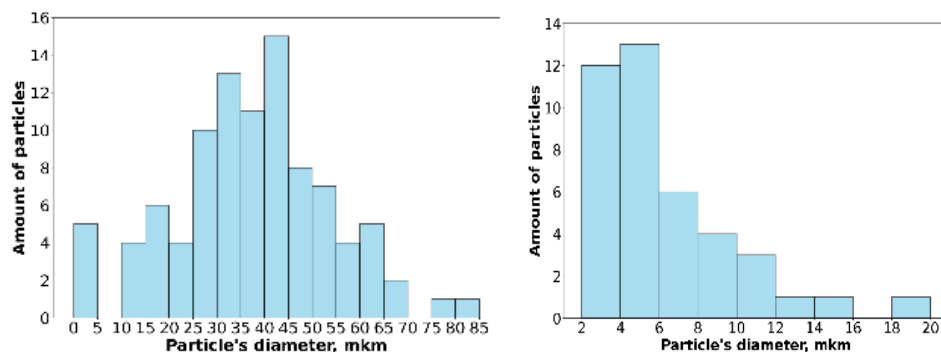


Рис. 20. Распределение по размерам частиц, осажденных при (а) - $K_p=50\%$; (б) - $K_p=45\%$.

В разделе 4.7 выполнена оценка предельно достижимых зарядов микрочастиц 5–50 мкм при используемом в эксперименте способе индукционной зарядки. Рассчитанные диапазоны зарядов сопоставлены с областями удержания при синусоидальной и прямоугольной формах напряжения. Определена доля оцененного диапазона зарядов, соответствующая условиям устойчивого удержания, в зависимости от размера частиц, амплитуды удерживающего напряжения и напряжения зарядки. Показано, что с увеличением размера частиц наиболее подходящая для удержания амплитуда удерживающего напряжения в целом смещается к меньшим значениям: от 4–5 кВ для частиц 5 мкм до 1–2 кВ для частиц 20–50 мкм. Для частиц 5–10 мкм расчетные области удержания охватывают до 86–96 % физически достижимого диапазона зарядов, тогда как для частиц 35–50 мкм эта доля снижается примерно до 50–57 %. Полученные результаты позволяют определить наиболее благоприятные сочетания напряжения зарядки и удерживающего напряжения.

В разделе 4.8 проведено экспериментальное подтверждение расчетных областей удержания. При синусоидальном напряжении последовательное уменьшение его амплитуды приводило к преимущественному выпадению крупных частиц. Частицы 50 мкм покидали ловушку преимущественно на первом этапе снижения напряжения, а содержание фракции 35 мкм последовательно уменьшалось до ее полного выпадения. Частицы 20 мкм сохранялись при дальнейшем снижении напряжения, а фракции 5–10 мкм характеризовались наиболее устойчивым удержанием. Наблюдаемая последовательность выпадения частиц качественно соответствует расчетным областям удержания.

При прямоугольном напряжении состав удерживаемых частиц определяли по пересечению расчетных областей удержания с оцененными диапазонами зарядов с учетом исходного распределения частиц по размерам (Рис.21). При напряжении зарядки 2.5 кВ эксперимент показал преимущественное удержание крупных частиц 20–50 мкм. С увеличением амплитуды напряжения наиболее выраженным становилось преобладание фракций 35–50 мкм, несмотря на преимущественное содержание мелких частиц в исходной смеси.

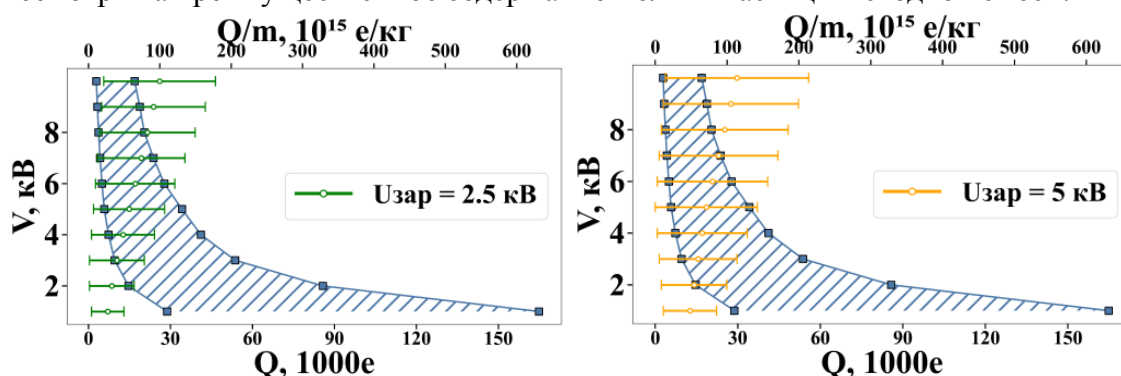


Рис. 21. Пересечение области удержания при прямоугольном напряжении для частицы 5 мкм и оцененных диапазонов заряда при зарядке 2.5 и 5 кВ.

При напряжении зарядки 5 кВ во всех исследованных режимах преобладали частицы 5 мкм. С увеличением амплитуды напряжения их доля возрастала, а содержание частиц 10–35 мкм в целом уменьшалось. Расчет и эксперимент наиболее близко совпали для мелкой фракции и одинаково описали изменение состава удерживаемых частиц. При напряжении зарядки 7 кВ во всех экспериментальных распределениях также преобладали частицы 5 мкм, при этом сохранялись все исследованные фракции размером до 50 мкм. Полученные распределения качественно подтвердили расчетный прогноз преимущественного удержания мелких частиц. Эксперимент подтвердил, что состав удерживаемых фракций определяется совместным влиянием напряжения зарядки, амплитуды удерживающего напряжения и размера частиц. Расчет качественно воспроизводит последовательность выпадения частиц при синусоидальном напряжении и изменение размеров при прямоугольном.

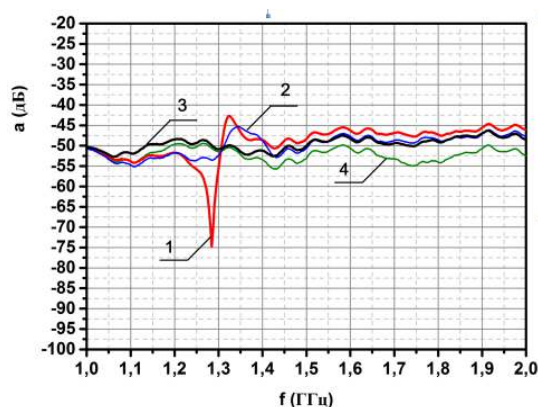
В **Главе 5** представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования резонансных свойств субволновых диэлектрических колец в СВЧ-диапазоне и способов управления их резонансным откликом. Исследованы резонансные характеристики одиночного диэлектрического кольца, его взаимодействие с плазменными и проводящими элементами кольцевой и линейной геометрии. Рассмотрено влияние геометрии, взаимного расположения и размеров дополнительных элементов на резонансную частоту, амплитуду и форму спектра магнитного поля. Показана возможность существенного изменения и подавления резонансного отклика диэлектрического кольца посредством включения электрического разряда низкого давления или введения проводящего элемента.

В **разделе 5.1** исследован экспериментально и теоретически резонансный отклик одиночных субволновых диэлектрических колец с диаметрами 38 мм и 16 мм при возбуждении плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона. Кольцо помещалось на расстоянии 50 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор k и вектор электрического поля E плоской падающей ЭМ-волны были параллельны плоскости колец, а вектор магнитного поля H – перпендикулярен ей. Измерен резонансный спектр и определена частота основного магнитного резонанса кольца. Выполнено численное моделирование взаимодействия падающей электромагнитной волны с диэлектрическим кольцом. Экспериментальная резонансная частота кольца диаметром 38 мм составила 1.33 ГГц, расчетная — 1.33 ГГц; для кольца диаметром 16 мм измеренная резонансная частота составила 2.48 ГГц и близка к рассчитанной резонансной частоте 2.5 ГГц. Полученное соответствие подтвердило адекватность расчетной модели и возможность ее использования для диэлектрического кольца с плазменными и проводящими элементами.

В **разделе 5.2** исследовано взаимодействие диэлектрического кольца диаметром 38 мм с разрядами и проводящими элементами кольцевой геометрии. Использован положительный столб разряда низкого давления спиральной люминесцентной лампы, часть которого образует полукольцо, непосредственно взаимодействующее с диэлектрическим кольцом. Расположение кольца, зонда и лампы показано на Рис.22,а. Измеренные спектры (Рис. 22,б) показывают, что при близком расположении полукольца включение разряда приводит к практически полному подавлению основного резонансного отклика диэлектрического кольца, тогда как при увеличении расстояния между ними более 5 мм эффект существенно ослабевает. Тем самым показана возможность управления резонансным откликом диэлектрического кольца путем включения и выключения полукольцевого разряда.



(а)



(б)

Рис. 22. (а) - Фотография диэлектрического кольца на спиральной лампе. Справа расположен зонд магнитного поля. (б) - Измеренные спектры магнитного поля: 1 – кольцо на лампе без разряда (красная линия 1); 2 – кольцо на лампе с разрядом (синяя линия 2); 3 – без кольца, лампа без разряда (черная линия 3); 4 – без кольца, лампа с разрядом (зеленая линия 4).

Проведен эксперимент и численный расчет системы из диэлектрического кольца и проводящего металлического полукольца, расположенного над диэлектрическим кольцом с

зазором 2 мм, срез параллелен вектору E , как на Рис.23,а, выпуклость направлена к зонду, для различных значений проводимости: 500 См/м, 1500 См/м, 5000 См/м и 58 млн См/м (проводимость меди). С увеличением проводимости уменьшается амплитуда и частота резонансного магнитного отклика. Наилучшее подавление резонанса достигается при проводимости меди. На Рис.23,б приведен эксперимент и расчет с влиянием медного полукольца на резонансный спектр диэлектрического кольца.

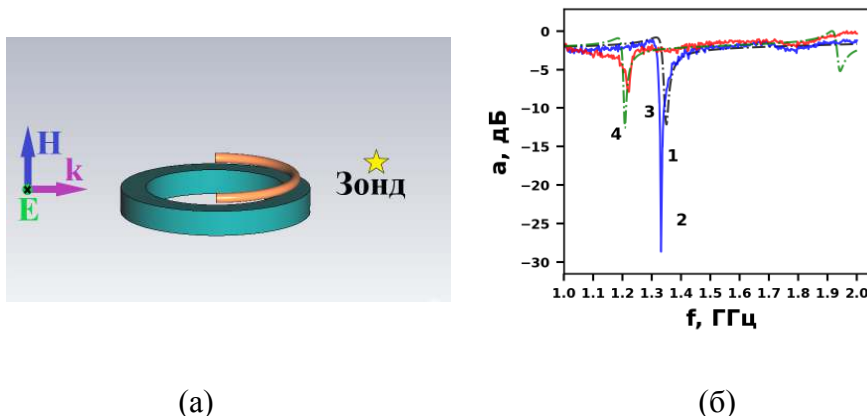


Рис. 23. (а) - Схема расположения диэлектрического кольца и металлического полукольца. (б) - Спектры диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм выпуклостью к зонду. Диэлектрическое кольцо без медного полукольца: 1 (черный) – расчет, 2 (синий) – эксперимент. С медным полукольцом: 3 (красный) – эксперимент, 4 (зеленый) – расчет.

При расчетах изменение положения среза проводящего полукольца параллельно волновому вектору меняет частоту и амплитуду регистрируемого спектра магнитного поля. При непосредственном контакте проводящего полукольца и диэлектрического кольца вместо одиночного резонанса формируется несколько резонансных максимумов, что свидетельствует о перераспределении электромагнитной энергии между несколькими модами связанной системы. Таким образом, резонансные характеристики системы определяются не только наличием проводящего элемента, но и характером его электромагнитной связи с диэлектрическим кольцом.

В разделе 5.3 исследовано влияние линейных разрядов и проводников на резонансный спектр субволнового плоского диэлектрического кольца при его возбуждении плоской ЭМ-волной. В качестве разрядов использованы линейные люминесцентные лампы низкого давления диаметром 12 и 24 мм и длиной 320 мм, а в качестве проводников — медные провода различной длины. Размещение линейного проводящего элемента за диэлектрическим кольцом экспериментально показало уменьшение амплитуды резонансного магнитного поля (Рис. 24,а), моделирование для проводника с потерями на Рис.24,б качественно совпало с экспериментом.

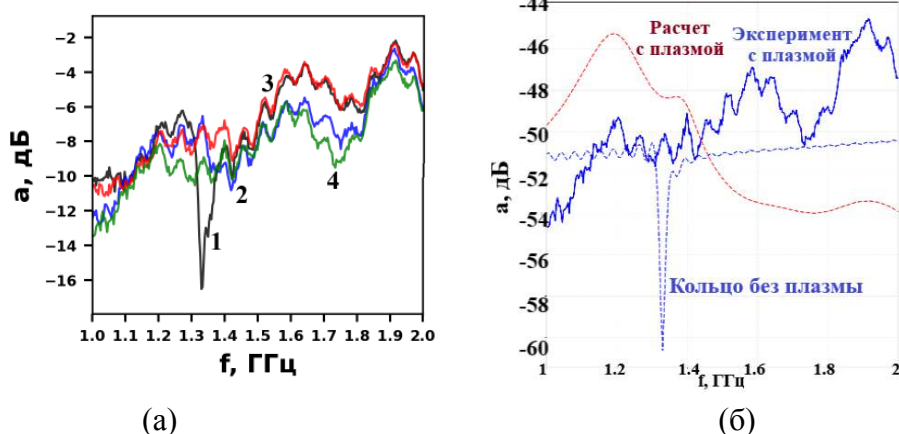


Рис.24. Резонансные спектры магнитного поля диэлектрического кольца и линейной лампы длиной 32 см, диаметром 12 мм, расположенной между антенной и кольцом. (а) – Эксперимент: 1 — кольцо и выключенная лампа; 2 — кольцо и включенная лампа; 3 — выключенная лампа без кольца; 4 — включенная лампа без кольца. (б) - эксперимент (синие линии) и расчет (красная линия).

Выполнены расчеты и экспериментальные исследования резонансных спектров диэлектрического кольца и медного проводника, расположенного между антенной и кольцом с различной длиной относительно длины волны 23 см, на которой возникает резонанс у одиночного диэлектрического кольца. Проводник с длиной, равной половине длины волны, вызывает смещение резонанса, уменьшение его амплитуды на резонансной частоте и уширение спектральной линии. При длине проводника, равной четверти длины волны, выраженный резонансный отклик сохраняется, но меняет полярность. Эксперимент качественно согласуется с расчетом.

В **Заключении** представлены основные результаты работы:

Экспериментально и численно исследованы устойчивые и неустойчивые траектории заряженных микрочастиц в воздухе при синусоидальном, симметричном и асимметричном прямоугольном удерживающем напряжении.

Установлено, что прямоугольное напряжение обеспечивает удержание частиц при меньших значениях заряда и амплитуды напряжения. Асимметрия импульсов вызывает движение частиц по диагоналям квадрата поперечного сечения, которые определяются знаком заряда.

Разработан метод расчета областей удержания частиц размером 5–50 мкм в координатах «амплитуда удерживающего напряжения - заряд частицы». Определено влияние размера частиц, формы, частоты и асимметрии напряжения; расчетные результаты подтверждены экспериментально.

Изменение частоты внешнего переменного электрического поля позволяет как стабилизировать движение частиц, так и возбуждать параметрическую неустойчивость, а постоянное внешнее поле обеспечивает управление положением кулоновской системы в ловушке.

Экспериментально показано устойчивое удержание диэлектрических микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом при синусоидальном и прямоугольном напряжении частотой 50 Гц. Обнаружен режим удержания частиц в узком диапазоне размеров 3–6 мкм. Показано, что с увеличением диаметра электродов расширяется диапазон размеров удерживаемых частиц и возрастает доля более крупных частиц.

Экспериментально и численно установлено, что электрический разряд и проводящие элементы позволяют подавлять резонансный отклик диэлектрического кольца, смещать его резонансную частоту и изменять форму спектра.

Цитируемая литература

1. Mihalcea B.M., Filinov V.S., Syrovatka R.A., Vasilyak L.M. The physics and applications of strongly coupled Coulomb systems (plasmas) levitated in electrodynamic traps // Physics Reports – Review Section of Physics Letters. – 2023. – V. 1016. – P. 1–103.

2. Bukharin M.M., Vasilyak L.M., Basharin A., Luk'yanchuk B., Ospanova A., Pecherkin V.Ya. All-dielectric magnetic dipole and Biot–Savart–Laplace law for displacement currents in the ring // Journal of Applied Physics. – 2025. – V. 137. – 203101.

3. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Обвивальнева А.А., Поляков Д.Н. Параметрическое возбуждение и стабилизация пылевых структур в тлеющем разряде при воздействии электрическими импульсами наносекундной длительности. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. №3. С. 87-94.

Публикации по материалам диссертации

1. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. «Устойчивые и неустойчивые траектории движения заряженной частицы в квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе» / *Прикладная физика*. — 2023. — № 2. — С. 29–34.
2. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я., Попов Д. И. «Сепарация полидисперсных заряженных микрочастиц в воздухе электродинамической линейной ловушкой» / *Прикладная физика*. — 2023. — № 3. — С. 39–44.
3. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. И., Печеркин В. Я. «Устойчивые и неустойчивые траектории движения заряженной частицы в квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе» / *Прикладная физика*. — 2024. — № 3. — С. 93–98.
4. Печеркин В. Я., Бухарин М. М., Василяк Л. М., Доброклонская М. С. «Резонансный спектр двух непараллельных диэлектрических колец» / *Прикладная физика*. — 2024. — № 4. — С. 76–80.
5. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. И., Василяк Л. М. «Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с удерживающим напряжением прямоугольной формы» / *Прикладная физика*. — 2024. — № 4. — С. 96–100.
6. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. И., Василяк Л. М. «Траектории микрочастиц разных знаков в квадрупольной ловушке с напряжением прямоугольной формы» / *Прикладная физика*. — 2024. — № 5. — С. 99–104.
7. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Владимиров В. В., Василяк Л. М. «Траектории заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с потенциалом прямоугольной формы» / *Вестник Объединенного института высоких температур*. — 2024. — Т. 15. — С. 44–48.
8. Доброклонская М. С., Печеркин В. Я., Василяк Л. М. «Воздействие плазмы на резонансное рассеяние магнитного поля диэлектрическим кольцом» / *Прикладная физика*. — 2026. — № 2. — С. 47–52.
9. Доброклонская М. С., Василяк Л. М., Владимиров В. В., Печеркин В. Я. «Удержание микрочастиц в квадрупольной ловушке с прямоугольной формой напряжения при атмосферном давлении» / *Прикладная физика*. — 2026. — № 3. — С. 41–46.