

## **АННОТАЦИЯ**

диссертации на соискание степени «доктор философии» (Ph.D)  
по специальности «6D060400 – Физика»

**ЭБДІРАХМАНОВ АСАН РАМАЗАНҰЛЫ**

### **СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию структурных и динамических свойств плазменно-пылевых структур в стратифицированном тлеющем разряде во внешних однородном и неоднородном магнитных полях при низких давлениях

#### **Актуальность темы**

Плазма, обычно называемая "четвертым состоянием вещества", является наиболее распространенной формой материи в видимой Вселенной. Когда к смеси атомов или молекул газа прикладывается внешний источник энергии, чаще всего в виде прямого нагрева или приложенного постоянного или переменного электрического поля, один или несколько электронов могут высвободиться из атома, порождая лавинный процесс ионизации. В результате этого образуется газообразная система, состоящая не только из электрически нейтральных атомов и молекул, но и из отрицательно заряженных электронов и положительно заряженных ионов. Эта система может как создавать электромагнитные поля, так и реагировать на них коллективным образом, что позволяет плазме проявлять свойства, присущие как жидкостям, так и газам.

В данной диссертации будет рассмотрена пылевая плазма, которая является объектом изучения в отдельном разделе физики плазмы. Пылевая плазма (также называемая комплексной плазмой, коллоидной плазмой) представляет собой многокомпонентную систему, состоящую в основном из ионов, электронов, нейтральных частиц и заряженных твердых частиц (т.е. пылевого компонента). В лабораторных условиях пылевая компонента состоит из частиц размером от нескольких нанометров до нескольких десятков микрометров, а в космическом пространстве твердые пылевые частицы могут быть размером в несколько метров. Таким образом, по сравнению с другими компонентами плазмы, пылевая компонента может рассматриваться как макроскопическая составляющая.

На сегодняшний день лабораторные исследования пылевой (комплексной) плазмы сфокусированы на изучении динамики заряженных микрочастиц в плазме в отсутствие магнитного поля. В подавляющем большинстве этих исследований именно конкуренция между гравитационными и электрическими силами определяет равновесие нулевого порядка: т.е. для того, чтобы взвесить микрочастицы в плазме, необходимо компенсировать гравитационную силу,

направленную вниз на частицы, другими силами. После левитации в плазме динамика частиц определяется межчастичными электростатическими силами (например, экранированное кулоновское взаимодействие), силами увлечения нейтральными частицами и ионами. Однако в присутствии магнитного поля все силы, действующие на пылевые частицы и зависящие от наличия заряда, потенциально подвержены изменениям. Более того, механизм зарядки пылевых частиц также будет изменен магнитным полем, поскольку динамика ионов и электронов становится доминирующей под влиянием действующей магнитной силы. Также, при достаточно большой напряженности магнитного поля прямая магнитная сила, действующая на заряженные частицы, может стать сравнимой с другими действующими на нее силами.

В 1996 году научная группа из Университета Нагоя провела эксперименты и численный анализ по изучению влияния азимутального потока ионов, вызванного  $\vec{E} \times \vec{B}$  дрейфом, на поведение пылевых частиц в намагниченной цилиндрической плазме газового разряда на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Проведенный анализ по распределению осажденных частиц диоксида кремния и пылевых частиц микронного размера в аксиальном магнитном поле, равном 870 Гс, показал, что азимутальная сила ионного увлечения может вызывать удаление пылевых частиц из плазмы при низком давлении. Данные результаты показали перспективность применения магнитных сил в технологических установках микроэлектроники для управления транспортными характеристиками пылевых частиц с целью их удаления из рабочей области.

Кроме того, в лабораторных условиях были исследованы свойства пылевых частиц под воздействием приложенного магнитного поля в радиочастотном, индукционном, в магнетронном и других видах разрядов. Однако, в настоящее время пылевая плазма мало изучена практически в тлеющем разряде в присутствии магнитного поля. В данной диссертационной работе пылевая плазма исследуется в страфицированном тлеющем разряде низкого давления при воздействии внешнего магнитного поля. Изложенные выше фундаментальные и прикладные проблемы свидетельствуют об **актуальности** описанной темы и представленной задачи.

#### **Цель работы.**

Экспериментальное исследование структурных и кинетических свойств пылевой плазмы тлеющего разряда во внешнем магнитном поле.

**Объектом исследования** является низкотемпературная комплексная плазма тлеющего разряда.

**Предмет исследования** – динамика плазменно-пылевых структур в страфицированном тлеющем разряде в однородном и неоднородном магнитных полях.

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

– проектирование, сборка и наладка экспериментальной установки для изучения влияния внешнего магнитного поля на пылевую плазму;

- изучение свойств плазменно-пылевых структур в однородном и неоднородном слабом магнитном поле;
- изучение свойств плазменно-пылевых структур в сильном магнитном поле на экспериментальной установке Cryo-Magn Room (Санкт-Петербургский государственный университет).

**Новизна работы.** Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней **впервые**:

- исследовано влияние неоднородного магнитного поля на плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде постоянного тока в инертном газе аргона;
- разработана модель, описывающая вращение плазменно-пылевых структур в страте тлеющего разряда, вызванное радиальной компонентой магнитного поля;
- исследовано влияние сильного неоднородного магнитного поля на динамику вращения плазменно-пылевых структур в страте тлеющего разряда в газе гелия.

**Положения, выносимые на защиту:**

1 Неоднородное магнитное поле вблизи торцов катушки Гельмгольца приводит к вращению плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде постоянного тока в газе аргоне при давлениях 0,2-0,25 торр и токах 1,3-1,8 мА с индукцией от 5 до 28 мТл.

2 В тлеющем разряде постоянного тока азимутальный круговой поток ионов, вызванный радиальной компонентой неоднородного магнитного поля, в  $10^4$  раз превышает поток, вызываемый аксиальной компонентой магнитного поля.

3 Неоднородность магнитного поля блокирует эффект инверсии вращения плазменно-пылевых структур в замагниченной комплексной плазме тлеющего разряда при давлении 2,4 торр и токе 1 мА.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Результаты, полученные в данной диссертации, представляют ценность для развития физики пылевой плазмы и физики низкотемпературной плазмы в целом. Они будут весьма полезны для глубокого понимания механизмов вращения пылевых структур в страте тлеющего разряда. Полученные новые сведения необходимы для описания стратифицированного тлеющего разряда в магнитном поле.

Известно, что в некоторых случаях наличие пылевых частиц в плазменной среде является нежелательным и создает трудности при производстве многих типов устройств микроэлектроники (например, датчиков изображения, плазменных дисплеев, тонкопленочных солнечных батарей и т.д.), требующих использования процесса травления, напыления или полимеризации с помощью плазмы. Пылинка, оседающая на обработанные плазмой поверхности, может разрушить или снизить качество электронных устройств. Для решения этой проблемы необходимо уметь контролировать и управлять динамикой пылевых частиц, с целью предотвращения их осаждения на подложку. В таких случаях

для удержания и перемещения их вне области рабочей зоны подложки можно использовать аксиальное или радиальное магнитное поле, создаваемое движущейся магнитной катушкой. Таким образом, контролируемое намагничивание плазмы может стать основой метода очистки от пылевых частиц в процессе подготовки устройств микроэлектроники.

Процессы взаимодействия плазмы с поверхностью материалов первой стенки существенно влияют на эффективность и срок службы энергетических установок на основе управляемого термоядерного синтеза. Известно, что конструктивной особенностью данных установок является наличие магнитных катушек и неизбежное присутствие больших магнитных полей как в пристеночной области, так и в области самой плазмы. Также на сегодняшний день достоверно известно образование большого количества пылевых частиц в пристеночной области в результате контакта плазменного шнура и материала первой стенки. Исходя из этого, можно заключить, что исследование взаимодействия магнитного поля с пылевой плазмой является актуальной задачей для оптимизации рабочих характеристик энергетических установок термоядерного синтеза.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** подтверждаются наличием публикаций в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором и в изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

**Личный вклад автора** заключается в том, что весь объем диссертационной работы, выбор метода исследования, сборка, наладка и модернизация экспериментальных установок, проведение экспериментов и анализ полученных данных выполнены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 22 печатных работы: 5 в журналах из Перечня КОКСОН МОН РК для опубликования основных результатов диссертации на соискание ученой степени PhD и 4 статьи в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Science (Clarivate Analytics) и Scopus; 13 работ в материалах Международных научных конференций.

**Апробация диссертационной работы.** Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

- на 24-ой международной конференции по явлениям в ионизованных газах «ICPIG» (2017, Ешторил, Португалия);
- на 8-ой международной конференции по физике пылевой плазмы «ICPDP-2017» (2017, Прага, Чехия);
- на 15-ом международном семинаре по физике пылевой плазмы (2018, Аубурн, шт. Алабама, США);

- на 9-ой международной конференции по физике плазмы и плазменных приложений «РРТ-9» (2018, Минск, Беларусь);
- на 9-ой международной научной конференции «Актуальные проблемы современной физики» (Абдильдинские чтения) (2018, Алматы);
- на международной конференции студентов и молодых ученых «ФАРАБИ ӘЛЕМІ» (2018-2021, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы);
- на 25-ой международной конференции по явлениям в ионизованных газах «ICPIG» (2019, Сапоро, Япония);
- на 17-м международном семинаре «Комплексные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением» (2019, Москва, Россия);
- на 2-ом ежегодном собрании Казахского физического общества (2019, Алматы, Казахстан);
- в научно-координационной сессии «Физика неидеальной плазмы» (2020, Москва, Россия);
- на международной конференции по физике неидеальной плазмы (2021, Дрезден, Германия)
- на 47-ой конференции Европейского физического общества по физике плазмы «EPS-XXXXII» (2021, Виртуальная конференция);

**Диссертационная работа выполнена** в соответствии с планами фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР): «Исследование свойств низкотемпературной комплексной плазмы во внешнем магнитном поле» 2018-2020 гг., ИРН АР05133536, «Исследование структурных и кинетических свойств пылевой плазмы в тлеющем разряде в электрическом и магнитном полях» 2020-2022 гг., ИРН АР08855651.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 3 разделов, заключения и списка использованных источников из 149 наименований, содержит 91 страниц основного компьютерного текста, включая 54 рисунка и 5 таблиц.