

На правах рукописи

АЛЕКСЕЕВСКАЯ Анастасия Александровна

**АКТИВНЫЕ БРОУНОВСКИЕ ЧАСТИЦЫ И ИХ СТРУКТУРЫ В
ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА**

1.3.9 - физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2023

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

Научный руководитель: д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории активных кулоновских систем ОИВТ РАН

ВАСИЛЬЕВ Михаил Михайлович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики Санкт-Петербургского

государственного университета (СПбГУ)

КАРАСЕВ Виктор Юрьевич;

д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории разреженных газов Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) НОВОПАШИН Сергей Андреевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)

Защита состоится « » декабря 2023 г. в ч. мин. на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки **Объединенного института высоких температур Российской академии наук** по адресу 125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2., экспозал.

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 « ____ »

2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

А.В.Тимофеев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Объединенный институт высоких температур Российской академии наук**, 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Коллоидная (пылевая) плазма широко распространена в природе. Она может быть обнаружена, например, в планетарных кольцах или вблизи комет, в межзвездных пылегазовых облаках, в припланетной ионосфере Земли и вокруг ее искусственных спутников, может такая плазма с конденсированной фазой возникать и в различных технологических процессах, а именно, в установках термоядерного синтеза с магнитным удержанием, микроэлектронике, в процессах плазменной сепарации. В коллоидных открытых системах возможно формирование структур активных броуновских частиц. Такие частицы могут найти свое применение как основа композитных материалов с заданными свойствами нового поколения, для транспортировки лекарственных средств, в приложениях микробиологии и коллоидной химии. Таким образом, изучение свойств и методов диагностики пылевой плазмы и разработка способов управления ее пылевой компонентой – актуальное и перспективное направление исследований.

Цель диссертационной работы заключалась в экспериментальном изучении динамики активных броуновских частиц и образованных ими структур в плазме тлеющего высокочастотного разряда емкостного типа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: модифицирован экспериментальный стенд для формирования и диагностики квазидвумерных ансамблей макрочастиц с высокой аксиальной симметрией в плазме высокочастотного газового разряда; проведены экспериментальные исследования динамических и структурных свойств кластеров и протяженных пылевых структур в широком диапазоне параметров газового разряда; проведен анализ экспериментально наблюдаемых явлений и характеристик квазидвумерных структур активных броуновских макрочастиц в газоразрядной плазме; установлены механизмы, описывающие экспериментально наблюдаемые явления.

Научная новизна работы

В данной работе представлено исследование квазидвумерных систем в газоразрядной плазме высокочастотного емкостного разряда низкого давления. Экспериментально показано, что в приэлектродной области ВЧ-разряда возможно формирование как однородных квазидвумерных структур заряженных частиц, так и с неизотропным распределением частиц в радиальном направлении: разреженных на периферии и более плотных в центре, и наоборот, более плотных по краям и разреженных в центральной части. Показано, что, меняя мощность разряда и/или давление плазмообразующего газа, можно влиять на радиальное распределение межчастичного расстояния в пылевом монослое и на однородность структуры.

В работе исследовано формирование течения в квазидвумерной плазменно-пылевой системе активных броуновских частиц при воздействии лазерного излучения. При этом свойства поверхности частиц и их способность к поглощению лазерного излучения влияют как на динамические свойства самих частиц, так и на

кинетику процесса развития пылевого «течения». Экспериментально исследовано формирование «течения» для монослойных структур с различной степенью упорядоченности (параметром неидеальности). Чем больше параметр неидеальности в системе, тем выше пороговое значение мощности лазерного излучения, при котором возникает течение в структуре. Для частиц с поглощающей лазерное излучение поверхностью (с металлической оболочкой) при воздействии на часть структуры наблюдалось формирование не только направленного движения в этой области, но и кинетический разогрев всей структуры.

Было экспериментально исследовано формирование кластеров и протяженных квазидвумерных структур активных броуновских частиц с анизотропией свойств (т.н. Янус-частиц) и их динамики в плазме низкого давления. Экспериментально обнаружено, что при малых мощностях лазера характер движения таких частиц является преимущественно направленно-хаотическим. С ростом мощности лазерного излучения сперва наблюдается уменьшение их кинетической энергии, а затем заметный рост. Для малого кластера, состоящего из 19 частиц (2 оболочки), обнаружено, что с ростом мощности лазерного излучения наблюдается уменьшение их динамической энтропии. При этом с ростом кинетической энергии частиц фрактальная размерность для ими образованной системы уменьшалась. Это фактически означает, что повторяемость динамических образцов поведения (траекторий) отдельных частиц уменьшается.

Экспериментально было исследовано формирование протяженных квазидвумерных структур из $\sim 10^3$ частиц и проведен анализ их динамических характеристик: траекторий, среднеквадратичного смещения, кинетической энергии. На основе анализа парных корреляционных функций, параметра неидеальности системы, топологических дефектов было изучено изменение упорядоченности структуры при различных значениях мощности лазерного излучения. Так, с увеличением мощности лазерного излучения от 0.05 Вт до 1.5 Вт наблюдался рост параметра неидеальности Γ^* в системе от 180 до 240 и уменьшение числа дислокаций и дисклинаций в системе.

Дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения с 1.5 до 4 Вт приводило к кинетическому разогреву пылевой структуры. При значении мощности лазерного излучения 2.5 Вт пропадало «расщепление» второго максимума парной корреляционной функции, что свидетельствует об исчезновении гексагональной кристаллической решетки и формировании жидкоподобной структуры.

Положения, выносимые на защиту:

1) Формирование квазидвумерных кластеров активных броуновских макрочастиц и их динамика в плазме высокочастотного разряда емкостного типа. Результаты анализа траекторий, среднеквадратичного смещения, изменения их кинетической энергии, фрактальной размерности и динамической энтропии при различных значениях плотности мощности лазерного излучения.

2) Экспериментальное обнаружение упорядочивания структуры кластера с увеличением плотности мощности лазерного излучения. При увеличении мощности лазерного излучения на поглощающей поверхности частиц в 10 раз, наблюдается структурный фазовый переход с увеличением эффективного параметра неидеальности с $\Gamma^* \sim 120$ до 330.

3) Условия формирования квазидвумерных структур заряженных макрочастиц в параболической электростатической ловушке с изотропным и неизотропным распределением частиц в радиальном направлении.

4) Формирование направленного движения активных броуновских макрочастиц в монослойной плазменно-пылевой структуре в ВЧ разряде. Экспериментальное обнаружение порогового характера развития «течения» и его зависимость от степени корреляции пылевой системы и свойств поверхности пылевых частиц.

5) Формирование протяженных квазидвумерных структур из янус-частиц и их динамика в плазме высокочастотного разряда емкостного типа. Результаты анализа траекторий, среднеквадратичного смещения, кинетической энергии и топологических дефектов.

Научная и практическая значимость работы

Вопрос о возникновении упорядоченности в открытых системах, далеких от равновесия - один из важнейших вопросов современного естествознания. Значимость представленных в работе исследований определяется экспериментальными результатами и полученными сведениями об эволюции плазменно-пылевых систем и их свойствах. Полученные в работе данные могут использоваться для изучения явлений самоорганизации и фазовых переходов в открытых диссипативных системах.

Полученные в работе результаты по исследованию динамических плазменно-пылевых структур позволяют глубже понять возникновение и существование различного рода неустойчивостей: автоколебаний, вихревого движения в таких структурах.

Полученные экспериментальные сведения о кинетике самоорганизации в пылевой плазме могут быть полезны для разработки практических методов управления пылевой компонентой в плазме, что может лечь в основу новых методов производства материалов с заданными свойствами и повышению качества различных технологических плазменных процессов.

Результаты, представленные в данной работе, могут найти применение в исследованиях широкого спектра специалистов, в т.ч. занимающихся изучением пылевой плазмы, ее свойств и практических приложений.

Достоверность и апробация результатов работы

Представленные в данной диссертационной работе результаты экспериментальных исследований с высокой точностью воспроизводятся в многочисленных экспериментах. Работа обобщает результаты, представленные в

научных публикациях автора.

Автор диссертации выступал с докладами на 57-й, 58-й, 59-й, 60-й, 61-й, 62-й и 63-й конференциях МФТИ. Принимала участие в 32-й, 33-й, 34-й конференциях: International Conference on Equations of State for Matter and International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia; 9 International Conference On The Physics Of Dusty Plasmas; 17th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas 2016, 2021; The 1st COMPACT Science Definition Workshop (Международная сессия 2021); Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics 2022, 9th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2023). По теме исследований опубликованы 5 научных работ в зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК [1-5].

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор принимал участие в подготовке и проведении экспериментальных работ, обработке и анализе результатов. Также автор принимал участие во всех совместных обсуждениях результатов и подготовке рукописей к публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы составляет 107 страниц, включая 61 рисунок, 5 таблиц и список цитируемой литературы, содержащий 110 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается обоснование актуальности данной работы, научной новизны и научной и практической значимости полученных экспериментальных результатов. А также в данной главе сформулирована цель работы и перечислены основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов, основных публикациях, структуре и объеме работы.

В **первой главе** представлена общая информация о коллоидной плазме, ее свойствах и распространении в природе, о фундаментальных исследованиях, о типах газового разряда. А также представлена информация об активном броуновском движении частиц в пылевой плазме, необходимая для понимания содержания диссертационной работы.

Во **второй главе** подробно описан экспериментальный стенд и средства диагностики для изучения коллоидной плазмы. Для решения задач по изучению свойств плазменно-пылевых систем была собрана конфигурация экспериментального стенда (рисунок 1), позволяющая варьировать в широком диапазоне параметры пылевой плазмы высокочастотного разряда емкостного типа, а также осуществлять воздействие на исследуемые пылевые структуры лазерным излучением.

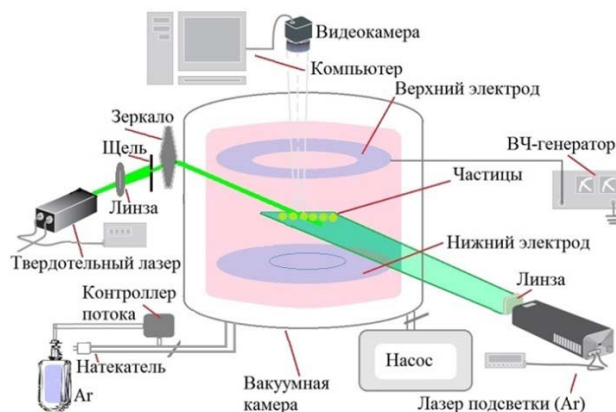


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки.

Основными элементами экспериментального стенда являются его вакуумная система, электрическая часть, обеспечивающая генерацию плазмы, и комплекс для диагностики пылевой компоненты в газовом разряде. Вакуумная часть, в свою очередь, состоит из газоразрядной вакуумной камеры и системы, которая контролирует напуск газа и давление в камере.

Газоразрядная вакуумная камера представляет собой металлический цилиндр с оптическими окнами (иллюминаторами): один в верхней части камеры и три в ее боковой поверхности. Диаметр каждого бокового иллюминатора составляет 10 см, которые используются для подсветки и воздействия лазерным излучением, а также для осуществления видеосъемки структуры в горизонтальной плоскости (вид сбоку). Смотровое окно в верхней части камеры имеет диаметр 30 см и используется для получения видеоизображения структуры в вертикальной плоскости (вид сверху).

Вакуумная система состоит из последовательно соединенных форвакуумного и турбомолекулярного насосов. Для регулировки скорости подачи и откачки атмосферы в газоразрядной камере используется вакуумный затвор с электроприводом и обратной связью с цифровым датчиком давления, расположенного в верхней части вакуумной камеры. Сперва газоразрядная камера откачивается до давления 10^{-2} Па с помощью форвакуумного насоса, после чего начинается откачка турбомолекулярным насосом до остаточного давления не хуже 10^{-5} Па. Далее в систему подается плазмообразующий (буферный) газообразный аргон. Для экспериментальных наблюдений значение давления обычно устанавливается в диапазоне 1-10 Па. В качестве датчика давления использовался емкостной вакуумметр «Баратрон», точность измерения которого составляла 0.05%. Блок электронного управления получает сигнал с датчика давления и регулирует положение клапана, автоматически подстраивая скорость удаления газа из вакуумной системы. Все это позволяет поддерживать необходимое для эксперимента давление. Для наполнения камеры воздухом (при необходимости ее дальнейшей разгерметизации и открытия) к ней присоединен клапан напуска атмосферы.

Электрическая часть состоит из ВЧ генератора, плоских медных электродов, расположенных внутри камеры и согласующего устройства. При подаче напряжения 300 В с несущей частотой 13,56 МГц на электроды от ВЧ генератора между электродами зажигался ВЧ емкостной разряд. Диаметр электродов во всех

экспериментах составлял 19 см. Они располагались в газоразрядной камере горизонтально на диэлектрических стойках на расстоянии 5 см друг от друга. Для данной установки возможна регулировка мощности для генерации плазмы в диапазоне от 0.1 до 30 Вт. При этом минимизация отраженной мощности обеспечивалась согласующим устройством.

Над верхним электродом был закреплен специальный цилиндрический контейнер с сетчатым дном, внутри которого располагались микрочастицы. Инжекция частиц в область разряда обеспечивалась механическим воздействием на контейнер с помощью постоянного магнита. После инъекции частиц контейнер перемещался в периферийную область камеры для предотвращения перекрытия изображения пылевой структуры, снимаемого видеокамерой, расположенной сверху. В экспериментах использовались различные типы частиц: монодисперсные сферические пластиковые частицы, пластиковые частицы с металлическим (медным) покрытием, частично покрытые металлом пластиковые частицы. Инжекция и наблюдение за формируемыми структурами в приэлектродной области газового разряда осуществлялось через отверстие в верхнем электроде диаметром 8 см.

Для прецизионного регулирования в горизонтальной плоскости электродов, и, таким образом, обеспечения формирования монослойных структур, была разработана двухступенчатая система позиционирования. На первом этапе горизонтальность обеспечивалась при установке электродов в камеру, посредством классического гидростатического нивелира. На втором этапе, после формирования структуры в газоразрядной плазме, посредством варьирования давления газа и мощности разряда в ней, формировалась область разрежения (войд). Если вакуумная камера и электроды в ней оказывались отклоненными от горизонтального положения, то войд находился не в центре пылевой структуры, а был смещен в ее периферийную часть. Поэтому посредством микрометрических винтов камера дополнительно выравнивалась так, чтобы войд находился в центре структуры. Таким образом обеспечивалось прецизионное выравнивание электродов в горизонтальной плоскости, не доступное другими методами.

Для предотвращения разлета частиц в горизонтальном направлении на нижний электрод помещалось металлическое кольцо, которое обеспечивало формирование параболической электростатической ловушки. Диаметр данного кольца подбирался в соответствии с размером исследуемой плазменно-пылевой системы.

Для визуального наблюдения плазменно-пылевая структура подсвечивалась лазерным излучением. В наших экспериментах использовался аргоновый лазер с длиной волны 514 нм. Коррелированность структуры и ее «фазовые» состояния менялись посредством воздействия на структуру расширенным однородным пучком аргонового лазера, а для локального воздействия, например, для формирования «течения» использовался дополнительный лазерный пучок, генерируемый твердотельным лазером.

Для регистрации частиц использовались две видеокамеры. Одна видеокамера

располагалась сбоку газоразрядной камеры, вторая - над установкой. В результате были получены видеоизображения плазменно-пылевой структуры «вид сверху» и «вид сбоку». Видеокамеры были синхронизированы. Размеры кадра составлял 1440/1440 пикселей, а частота съемки могла варьироваться от 25 до 1000 кадров/сек. После обработки видеоизображения были получены различные характеристики пылевых частиц (их координаты, скорости и траектории движения [6]), используемые в дальнейшем для анализа плазменно-пылевых структур.

В **третьей главе** представлены экспериментальные исследования по изучению квазидвумерных плазменно-пылевых систем в приэлектродной области ВЧ разряда.

В **п.3.1** описаны результаты исследований малых кластеров в ВЧ разряде.

В данной работе исследуется состояние одиночной коллоидной частицы в ВЧ-разряде с помощью фрактального анализа её траектории. Эксперименты проводились с частицами трех типов [4]. Во всех экспериментах использовались монодисперсные сферические пластиковые частицы (МФ) диаметром 10 мкм. Частицы первого типа не имели покрытия, частицы второго типа имели медную оболочку, а частицы третьего типа частично были покрыты металлом (янус-частицы).

Эксперименты проводились следующим образом. Одиночная частица помещалась в ВЧ-разряд, где заряжалась потоками электронов и ионов, и левитировала, двигаясь в пределах ловушки. Для каждой мощности лазера производилась видеозапись длиной 30 секунд. При этом мощность лазера варьировалась от 0.05 до 1.5 Вт. Данный эксперимент повторялся для каждого типа частиц. После обработки видеоданных были получены координаты, а также траектории частиц, которые представлены на рисунке 2. По данным этого графика можно сделать вывод, что все частицы двигались по круговой траектории. Отличительной особенностью траектории каждой частицы являлась степень зашумлённости из-за случайных колебаний частиц. Следует также отметить, что диаметры траекторий также отличались в зависимости от типа частиц. Это вызвано воздействием на частицы внешних сил, инициируемых лазерным излучением.

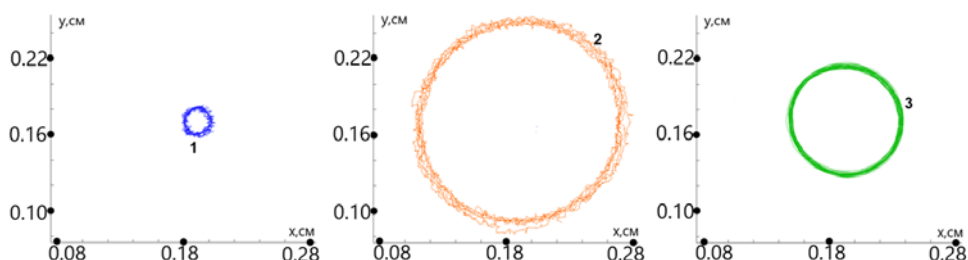


Рисунок 2. Траектории частиц за 8 секунд для 1 Вт. Цифрой «1» голубым цветом отмечена пластиковая МФ-частица, «2» оранжевым - пластиковая частица с медной оболочкой, «3» зеленым – частица, частично покрытая медью (янус-частица).

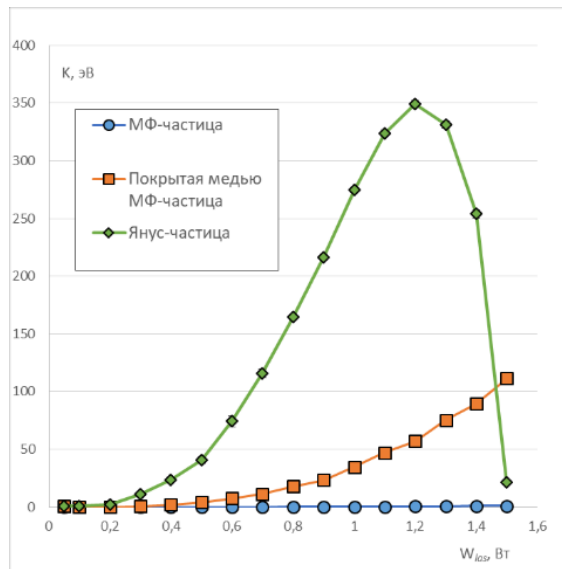


Рисунок 3. Кинетическая энергия при различных мощностях лазера для трех типов частиц.

Для всех трех видов частиц посчитаны кинетические энергии в зависимости от мощности лазерного пучка. По графику можно отметить, что различные частицы с разной эффективностью преобразуют энергию лазерного излучения в кинетическую энергию движения частиц. Для пластиковой частицы без покрытия видно, насколько мало меняется кинетическая энергия (от 0.04 до 1 эВ). А для частиц с медной оболочкой энергия увеличивается в несколько раз сильнее. При минимальной мощности лазера кинетическая энергия для таких частиц составляет 0.7 эВ, а для максимальной мощности достигает 130 эВ.

По графику кинетической энергии заметно, как нестандартно меняется значение энергии для частицы, поверхность которой только частично содержала медь. Для начала следует отметить, насколько сильно меняется энергия для такой частицы в зависимости от мощности лазера. Сначала энергия возрастает от 0.6 до 350 эВ. Затем кинетическая энергия частицы уменьшается после превышения мощности лазера 1.2 Вт. Этот эффект, возможно, объясняется неоднородностью покрытия на поверхности частицы, частично покрытой медью. Металлическое покрытие неравномерно и не занимает ровно 50% поверхности частицы. Пластиковая частица имеет на своей поверхности лишь металлические островки. Если разогревать такую поверхность лазерным излучением, это может приводить к случайному вращению частицы. А резкое изменение направления движения янус-частицы приводит к немонотонному изменению кинетической энергии. Из-за этого разогрев и поведение частично покрытых медью частиц могут отличаться друг от друга в зависимости от выбранных частиц.

Анализируя зависимости энтропии первого пересечения [7] и её производной от параметра огрубления ε^* , были получены области локализации и фрактальные размерности траекторий частиц.

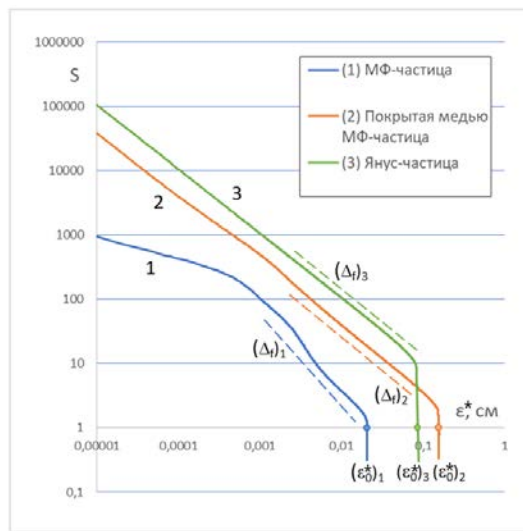


Рисунок 4. Динамическая энтропия первого пересечения от параметра огрубления ε^* для трех видов частиц при мощности лазера 1 Вт. Отмеченные пунктиром линии - логарифмические производные $d(\lg(S(\varepsilon^*))) / d(\lg \varepsilon^*)$. Точки на пересечении с осью абсцисс - величины областей локализации.

Итак, в данной главе проанализированы экспериментальные данные по движению одиночных частиц трёх типов в ловушке в высокочастотном емкостном разряде: 1) пластиковая частица без покрытия (МФ), 2) пластиковая частица с медной оболочкой, 3) пластиковая частицы, частично покрытая металлом. Кинетическая энергия пластиковых частиц, полностью или частично покрытых металлом, сильно меняется с увеличением мощности лазера. Это подтверждает тот факт, что данные частицы являются активными. Для частиц, частично покрытых металлом, кинетическая энергия меняется немонотонно (из-за неоднородности поверхности). А кинетическая энергия для частиц с медной оболочкой при увеличении мощности лазера увеличивается на два порядка больше, чем для частиц без покрытия.

Фрактальная размерность [8] траекторий падает с двух до единицы с ростом энергии частицы. Для пластиковой частицы без покрытия и для частицы с медной оболочкой изменение происходило плавно, а для частиц, частично покрытых металлом, фрактальная размерность меняется скачком.

Область локализации ε_0^* (диаметр окружности, внутри которой частица движется в течение эксперимента) растёт с ростом кинетической энергии частицы, зависимость $\varepsilon_0^* \propto \sqrt{K}$. Область локализации для рассмотренных экспериментов с хорошей точностью совпадает с максимальным средним смещением частицы, полученным из максимального среднеквадратичного смещения.

Было проведено наблюдение качественной и количественной разницы в изменении характеристик движения пылевых частиц в плазме при варьировании внешнего потока энергии. Продемонстрировано, что движение исследуемых частиц является фрактальным, т.е. их траектории имеют дробную фрактальную размерность. Фрактальная размерность траекторий зависит от кинетической энергии частицы и меняется при изменении мощности внешнего лазерного излучения.

Далее была исследована структура, состоящая из 19 частиц. Использовалась

экспериментальная установка, изображенная на рисунке 1. После обработки видеоданных были получены координаты частиц, их скорости, траектории, параметр неидеальности, парные корреляционные функции, среднеквадратичные смещения, фрактальная размерность и динамическая энтропия.

При уменьшении мощности лазера структура становится более «разогретой». Это поведение ровно противоположно другим типам частиц. В то время как для полностью покрытых частиц рост мощности лазерного излучения приводил к «плавлению» кластера, где сперва наблюдалось увеличение траектории внутри своей оболочки, затем происходили перескоки между оболочками, для кластера из Янус-частиц наблюдается противоположная картина. При малых значениях мощности лазерного излучения мы наблюдаем движение частиц не только внутри своей оболочки, но и их перескоки между центральным положением и двумя оболочками. А увеличение мощности лазерного излучения приводит не к дополнительному разогреву, а к уменьшению кинетической энергии частиц и возникновению упорядоченного состояния кластера.

На рисунке 5 представлены кинетические энергии в зависимости от мощности лазера.

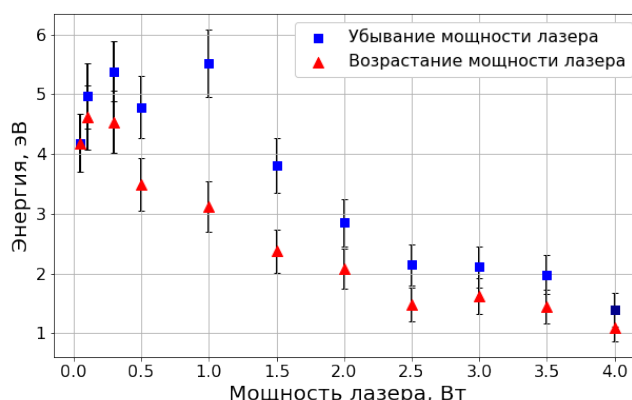


Рисунок 5. Кинетическая энергия при различных мощностях лазера.

На рисунке 6 представлены среднеквадратичные смещения от максимальной мощности лазера до минимальной. А на рисунке 7 представлены динамические энтропии, посчитанные для данного эксперимента.

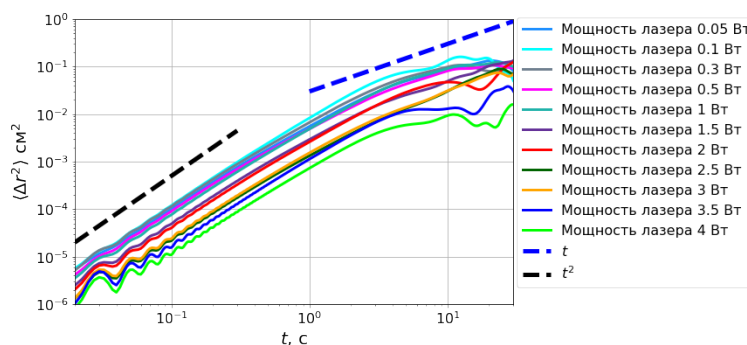


Рисунок 6. Среднеквадратичные смещения от времени при мощности лазера от 0.05 Вт до 4 Вт.

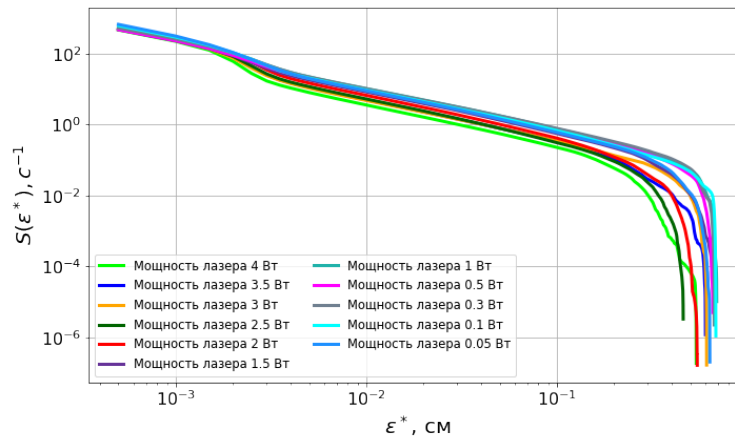


Рисунок 7. Динамические энтропии от параметра огрубления ε^* для мощности лазера от 0.05 Вт до 4 Вт.

Из функции динамической энтропии $S(\varepsilon^*) \equiv 1/\tau(\varepsilon^*)$, где $\tau(\varepsilon^*) = \int_0^\infty P_{\varepsilon^*}(t)dt$,

а $P_{\varepsilon^*}(t)$ – вероятность того, что частица достигнет границы ε^* в момент времени между t и $t+dt$, можно получить функцию фрактальной размерности: $\Delta(\varepsilon^*) \equiv d(\log(\tau(\varepsilon^*))) / d(\log(\varepsilon^*))$. Эта производная представлена на рисунке 8.

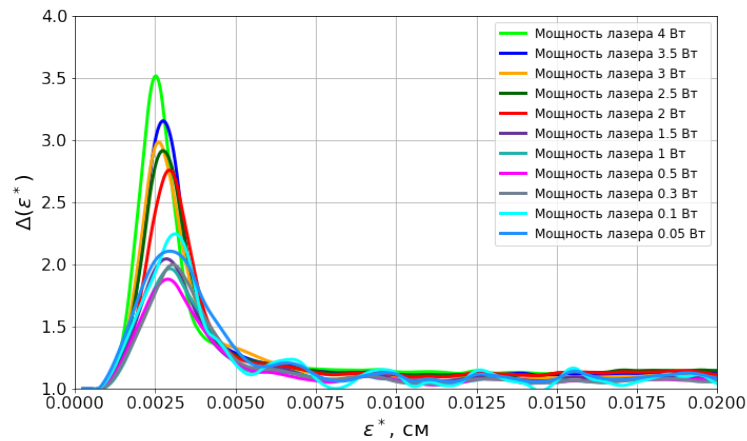


Рисунок 8. Функция фрактальной размерности от параметра огрубления ε^* для мощности лазера от 0.05 Вт до 4 Вт.

Траектория локализованной частицы состоит из витков спирали, радиусом ~ 0.002 см. Это значение примерно соответствует максимуму на графике фрактальной размерности для каждого эксперимента. Таким образом, функция фрактальной размерности показывает, что траектория частицы склонна к самоповторениям при достижении $\varepsilon^* \sim 0.002$. Далее в данной главе было построено значение максимума функции фрактальной размерности в зависимости от энергии системы. После чего сделан вывод, что с увеличением энергии системы траектории частиц все менее склонны к повторяемости. Определены значения фрактальной размерности, которые находятся в промежутке от 1.05 до 1.18, что соответствует дробному броуновскому движению.

В п.3.2. представлены результаты исследования формирования монослоя с различной анизотропией в радиальном направлении [3].

Для экспериментального исследования квазидвумерных структур заряженных макрочастиц, формируемых в плазме ВЧ разряда применялся экспериментальный

стенд, представленный на рисунке 1. Основным элементом стенда являлась вакуумная камера с оптическими окнами в горизонтальной плоскости, и иллюминатором в верхней части камеры. Воздушная атмосфера из камеры откачивается и наполняется плазмообразующим газом – аргоном, до рабочего давления 3-9 Па. В центре камеры расположены два плоских горизонтальных электрода, расстояние между которыми составляет 5 см. В разряд вбрасывались пластиковые частицы, диаметр которых 10.6 мкм (плотность 1.51 г/см³). Для создания электростатической ловушки на нижнем электроде устанавливалось кольцо. Диаметр используемого кольца 80 мм, а высота 2 мм. Данное кольцо удерживало от разлета заряженные в плазме пылевые частицы в радиальном направлении. Движение частиц, подсвеченных плоским горизонтальным пучком аргонового лазера, регистрировалось видеокамерой. Камера располагалась над структурой и снимала вид структуры сверху.

Были проведены две серии экспериментов с монослойной структурой: первая при изменении мощности разряда от 5 до 30 Вт и постоянном давлении рабочего газа 5 Па; а вторая при изменении давления от 3 до 9 Па и постоянной мощности ВЧ генератора $W=13.1$ Вт. Были отобраны по четыре наиболее характерных эксперимента для каждой серии. Далее приводятся изображения пылевых структур в этих отобранных экспериментах и данные о свойствах пылевых структур, полученные в результате обработки видеофильмов длительностью 30 секунд, снятых с частотой 400 кадров в секунду. Целью данных экспериментов было изучение и описание изменения плотности и кинетической энергии частиц монослоя по мере удаления от центра ВЧ разряда при изменении таких параметров ВЧ разряда, как давление и мощность.

На рисунке 9 представлен видеокادر монослойной структуры заряженных частиц в плазме ВЧ разряда. Экспериментально наблюдалась эволюция структуры при изменении параметров разряда. По измеренным из видеозаписи координатам частиц было проанализировано радиальное распределение межчастичных расстояний в структуре.

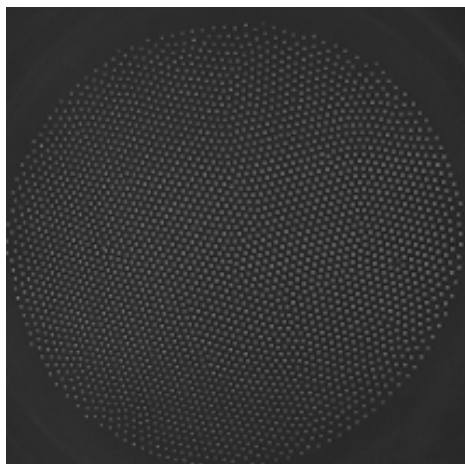


Рисунок 9. Кадры видеозаписи однородной монослойной структуры в плазме ВЧ разряда. $W=6.9$ Вт, $P=5$ Па

Экспериментально наблюдалось, что при фиксированном давлении плазмообразующего аргона $P=5$ Па изменение мощности разряда приводит к изменению межчастичного расстояния в структуре (Рис.10).

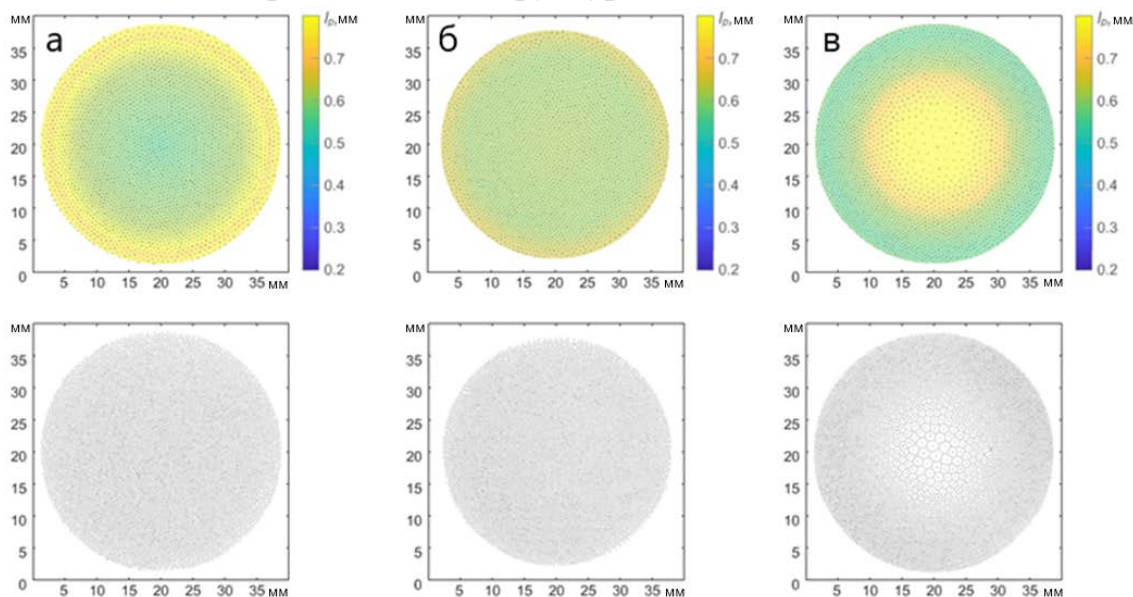


Рисунок 10. Квазидвумерная структура пылевых частиц в аргоновой плазме ($P = 5$ Па) при различной мощности ВЧ разряда: а) 4.4 Вт, б) 6.9 Вт, в) 16.7 Вт. На цветовой диаграмме приведено радиальное распределение межчастичного расстояния при различной мощности газового разряда. Снизу представлено изменение в однородности структуры - ячейки Вороного.

При мощности $W= 4.4$ Вт межчастичное расстояние в центральной части структуры оказывалось примерно в 1,5 раза меньше межчастичного расстояния на периферии структуры. Однако с ростом мощности пылевой монослой менялся и при $W=6,9$ Вт межчастичные расстояния в структуре выравнивались. Дальнейший рост мощности разряда до $W=16,7$ Вт приводил к формированию разреженного участка в центральной части структуры, где межчастичные расстояния были значительно больше чем на периферии структуры (рисунок 11). Дальнейшее увеличение мощности приводило к формированию войда в центральной части структуры.

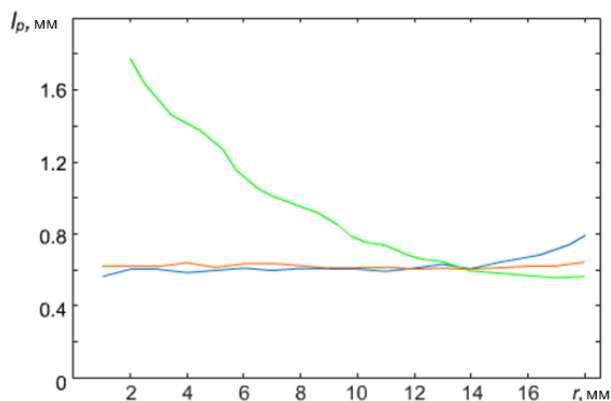


Рисунок 11. График зависимости радиального распределения среднего межчастичного расстояния в квазидвумерной структуре пылевых частиц в аргоновой плазме (давление 5 Па) при различной мощности ВЧ разряда: синий график при $W=4.4$ Вт; красный график при 6.9 Вт; зеленый график при 16.7 Вт.

Аналогичные наблюдения были проведены при мощности разряда $W=13.1$ Вт и изменении давления аргона в газоразрядной камере (рисунок 12). При мощности $P=3$ Па межчастичное расстояние в центральной части структуры оказывалось примерно в 2 раза меньше межчастичного расстояния на периферии структуры. С ростом давления до $P = 4$ Па межчастичные расстояния в структуре выравнивались. Дальнейший рост давления до $P = 5$ Па приводил к формированию разреженного участка в центральной части структуры (рисунок 13).

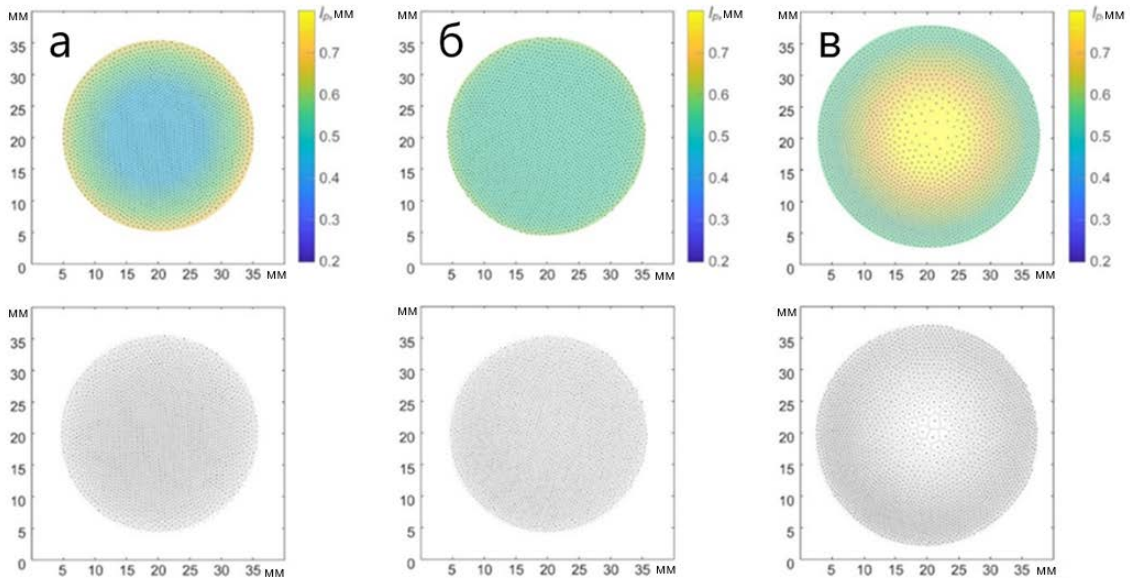


Рисунок 12. Квазидвумерная структура пылевых частиц в аргоновой плазме ВЧ разряда при мощности ВЧ разряда $W=13.1$ Вт и различном давлении буферного газа: а) 3 Па, б) 4 Па, в) 5 Па. На цветовой диаграмме приведено радиальное распределение межчастичного расстояния при различной мощности газового разряда. Снизу представлено изменение в однородности структуры - ячейки Вороного.

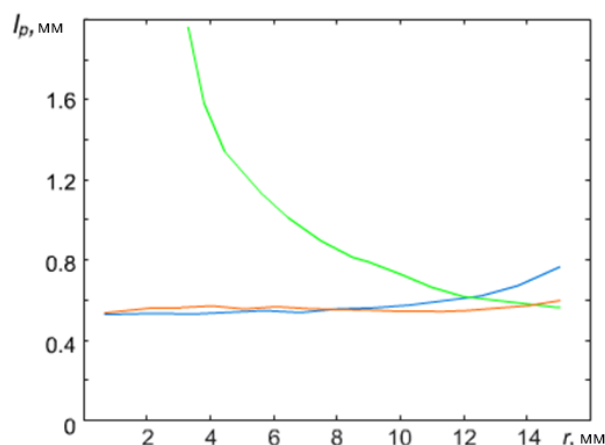


Рисунок 13. График зависимости радиального распределения среднего межчастичного расстояния в квазидвумерной структуре пылевых частиц в аргоновой плазме ВЧ разряда при мощности ВЧ разряда $W=13.1$ Вт и давлении буферного газа: синяя кривая при $P=3$ Па; красная при 4 Па; зеленая при 5 Па.

В п.3.3. представлены результаты исследования формирования «течения» с

помощью воздействия лазера на покрытые и непокрытые частицы [2].

Для формирования «течения» в плазменно-пылевых структурах использовался экспериментальный стенд, который представлен на рисунке 1. Эксперименты проводились в газоразрядной вакуумной камере. В разряд вбрасывались пластиковые частицы с медной оболочкой, диаметр которых 9.95 мкм. На нижнем электроде устанавливалось кольцо. Диаметр используемого в данном эксперименте кольца составлял 85 мм, а высота 2 мм. Аргон использовался в качестве буферного газа.

Течение в однослойной плазменно-пылевой системе создавалось при помощи излучения твердотельного лазера, направленного в центральную часть исследуемой структуры. Для изменения параметра неидеальности в системе кинетический «разогрев» плазменно-пылевой структуры производился при помощи лазерного излучения различной мощности предварительно расширенного лазерного «ножа». Результаты регистрировались видеокамерой, которая располагалась над структурой вертикально.

На рисунке 14 можно рассмотреть траектории частиц за 0.5 секунды. По данным эксперимента были посчитаны параметры неидеальности $\Gamma \sim 70, 400$ и 500 .

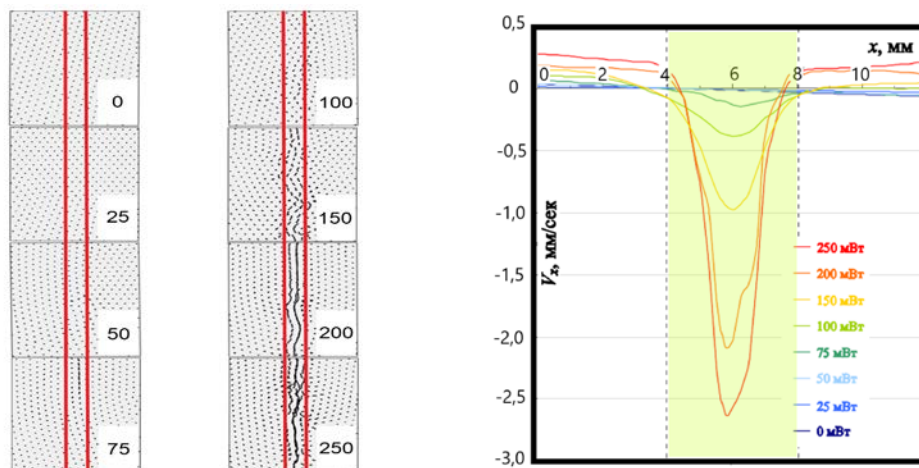


Рисунок 14. Траектории частиц и распределения скоростей при значениях мощности лазера $W = 0; 25; 50; 75; 100; 150; 200$ и 250 мВт. Область воздействия лазерного пучка отмечена зеленым цветом.

Из анализа траекторий движения и распределения скорости пылевых частиц можно сделать вывод о пороговом типе течения. При минимальных мощностях лазерного воздействия не возникало никакого течения. Далее мощность лазера увеличивалась, что приводило к формированию направленного движения частиц.

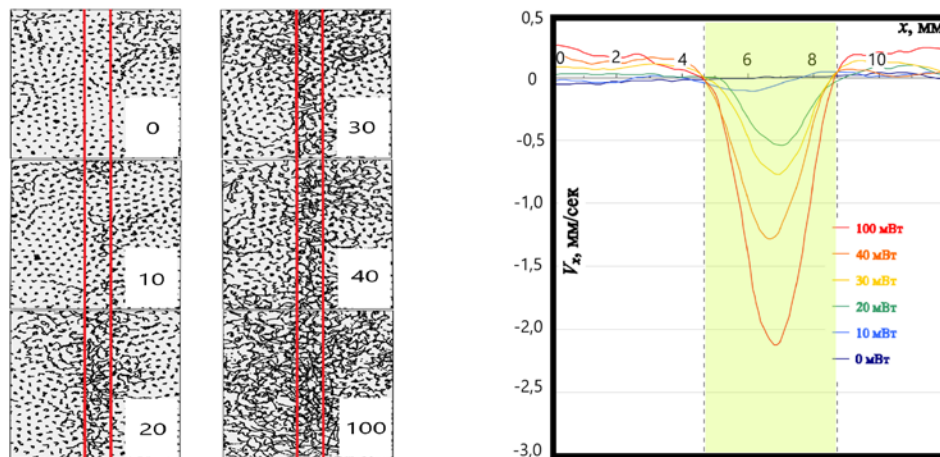


Рисунок 15. Траектории частиц с медной оболочкой ($\Gamma^* \sim 180$) и распределения скоростей при мощностях лазера $W = 0; 10; 20; 30; 40; 100$ мВт.

Изменение мощности лазера, который создает течение, приводило к кинетическому разогреву системы сначала в центре, затем на периферии структуры. На рисунке 15 показаны траектории пылевых макрочастиц с медным покрытием. Время эксперимента составляло 0.5 секунды. Мощность лазера была $W = 0; 10; 20; 30; 40$ и 100 мВт. Визуально течение заметить невозможно, но распределение скоростей показывает рост составляющей скорости, которая направлена вдоль пучка.

В данной главе показаны результаты исследования поведения плазменно-пылевой жидкости, образованной покрытыми и непокрытыми макрочастицами под действием лазерного облучения. Изучены зависимости распределения скоростей макрочастиц меламин формальдегида с медным покрытием и без от значений мощности продавливающего лазера. Установлено, что в случае непокрытых меламин-формальдегидных частиц имеет место воздействие светового давления, приводящее к возникновению ламинарного «течения». В случае покрытых медью меламин-формальдегидных частиц имеется две силы – световое давление и фотофоретическая сила. Световое давление приводит к некоторому движению в направлении светового пучка, а фотофоретическая сила ведет к разогреву пылевой компоненты. Высказано предположение, что одной из причин проявления такого поведения могут быть дефекты в покрытии, приводящие к асимметрии разогрева частиц и хаотическим для разных частиц отклонением фотофоретической силы от направления лазерного луча.

В п.3.4. представлены выводы по главе 3. Проведено наблюдение качественной и количественной разницы в изменении характеристик движения коллоидных частиц в плазме при варьировании внешнего потока энергии. Продемонстрировано, что движение исследуемых частиц является фрактальным, т.е. их траектории имеют дробную фрактальную размерность. Фрактальная размерность траекторий зависит от кинетической энергии частицы и меняется при изменении мощности внешнего лазерного излучения.

Также приведены результаты экспериментальных наблюдений, однозначно

показывающих, что в плазме ВЧ разряда возможно формирование структур заряженных частиц не только разреженных на периферии и более плотных в центре, но и с изотропным межчастичным расстоянием, а также более разреженных в центральной части. Показано, что, меняя мощность разряда или давление плазмообразующего газа, можно влиять на радиальное распределение межчастичного расстояния в пылевом монослое и на однородность структуры. Ранее на основе гидродинамической модели пылевой плазмы в емкостном ВЧ разряде без учета силы ионного увлечения было предположено, что при помещении частиц в параболическую ловушку они формируют структуру, в которой плотность частиц становится более разреженной к периферии. Однако, в настоящей работе показано, что сила ионного увлечения может быть по величине сравнимой с силой тяжести. Полагается, что в модели важно учитывать силу ионного увлечения, т.к. именно она является ответственной за изменение характера распределения пылевых частиц по радиусу ВЧ разряда. Известно, что эта сила приводит к формированию войдов в ВЧ разрядах и в наших экспериментах образование войдов также имело место при определенных параметрах плазмы. Проверка гипотезы о влиянии силы ионного увлечения на характер неоднородности в распределении пылевых частиц требует проведения более точных расчетов.

Далее были показаны результаты исследования поведения плазменно-пылевой жидкости, образованной покрытыми и непокрытыми макрочастицами под действием лазерного облучения. Изучены зависимости распределения скоростей пластиковых частиц с медным покрытием и без от значений мощности продавливающего лазера. Установлено, что в случае непокрытых меламин-формальдегидных частиц имеет место воздействие светового давления, приводящее к возникновению ламинарного течения. В случае покрытых медью меламин-формальдегидных частиц имеются две силы – световое давление и фотофоретическая сила. Световое давление приводит к некоторому движению в направлении светового пучка, а фотофоретическая сила ведет к разогреву пылевой компоненты. Высказано предположение, что одной из причин такого поведения могут быть дефекты в покрытии, приводящие к асимметрии разогрева частиц и хаотическим для разных частиц отклонением фотофоретической силы от направления лазерного луча.

В **четвертой** главе представлены результаты исследования динамических и структурных переходов в квазидвумерной системе янус-частиц [10] в ВЧ разряде.

В п.4.1. приведено описание проведенного эксперимента с протяженной монослойной плазменно-пылевой структурой.

В п.4.2. представлены исследования формирования протяженных квазидвумерных структур из янус-частиц и их динамики в плазме высокочастотного разряда емкостного типа на основе анализа их траекторий, среднеквадратичного смещения и кинетической энергии.

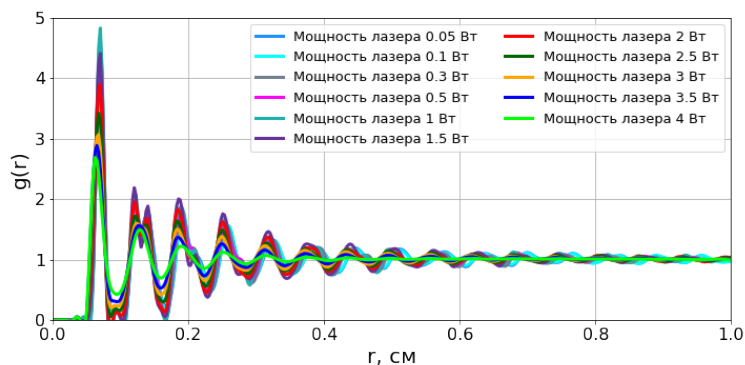


Рисунок 16. Парные корреляционные функции Янус частиц при мощности лазера от 0.05 Вт до 4 Вт.

Для анализа упорядоченности данной структуры были построены парные корреляционные функции при различных мощностях лазера (рисунок 16). При мощностях лазера от 0.05 до 2.5 Вт на графиках присутствует «расщепление» второго максимума. При увеличении мощности лазера от 2.5-4 Вт «расщепление» второго максимума парной корреляционной функции пропадает, что свидетельствует об исчезновении гексагональной кристаллической решетки и формировании жидкоподобной структуры. Также по первому пику парной корреляционной функции были посчитаны параметры неидеальности, представленные на рисунке 17. По данному графику видно, что при мощности лазера 1-1.5 Вт структура находится в самом упорядоченном состоянии.

Далее для данной структуры были посчитаны кинетические энергии частиц (рисунок 18). Все посчитанные кинетические энергии совпадают с визуальным наблюдением за структурой.

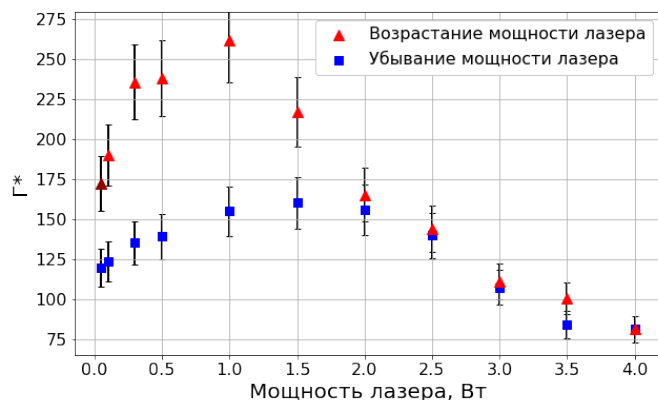


Рисунок 17. Параметры неидеальности при различной мощности лазера.

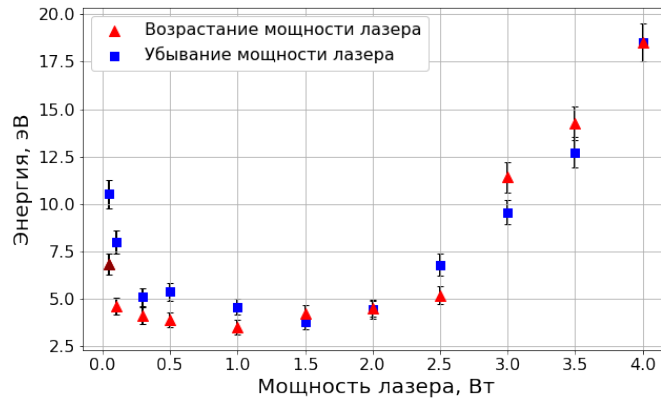


Рисунок 18. Кинетическая энергия при различной мощности лазера.

Также в данной главе был проведен анализ дефектов (рисунок 19). Дефектом называется любое нарушение трансляционной симметрии кристаллической структуры. Для двумерной плазменно-пылевой структуры в идеальной гексагональной решетке каждая частица имеет ровно шесть ближайших соседей. Но в наших экспериментах наиболее часто встречаются не только дисклинации (изолированные дефекты с 5-ю или 7-ю ближайшими соседями), но и *дислокации* (связанные 5-7 пары дисклинаций) и *дислокационные пары* (связанные 5-7-5-7 четверки дисклинаций). Согласно КТНУ-теории, диссоциация дислокационных пар на свободные дислокации (т.е. изолированные 5-7 пары) является причиной фазового перехода «кристалл – гексатическая фаза», а диссоциация дислокаций на свободные дисклинации (т.е. изолированные 5- или 7- дефекты) приводит к фазовому переходу «гексатическая фаза - жидкость» [9].

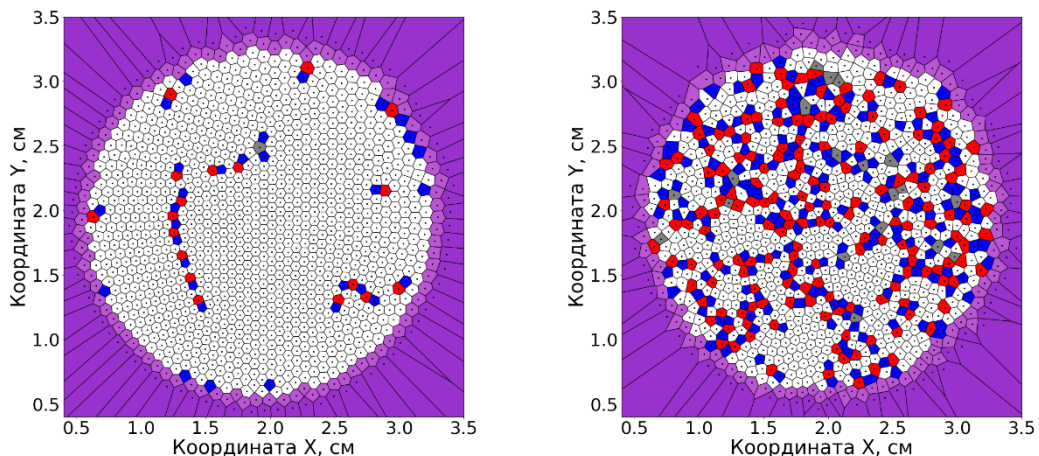


Рисунок 19. Диаграмма Вороного для структур, при воздействии лазерного излучения различной мощности а) 1 Вт, б) 4 Вт. Белым цветом отмечены частицы с шестью ближайшими соседями, фиолетовым цветом выделены периферийные частицы, синим и красным отмечены частицы с пятью и семью ближайшими частицами соответственно.

В п.4.3 представлены выводы по главе 4. В данной главе были представлены исследования формирования протяженных квазидвумерных структур из янус-частиц и их динамики в плазме высокочастотного разряда емкостного типа на основе

анализа их траекторий, среднеквадратичного смещения, кинетической энергии и топологических дефектов. Было показано, как менялась упорядоченность структуры при различных мощностях лазера. При увеличении мощности лазера структура сначала становилась более упорядоченной, а начиная с мощности 3 Вт становилась все более «разогретой». А в обратном эксперименте при уменьшении мощности лазера с максимальной до минимальной структура становилась сначала менее разогретой, а начиная с 1 Вт снова начинала разупорядочиваться. Наглядно продемонстрировано увеличение количества дефектов при «разогреве» структуры пылевых частиц в плазме ВЧ разряда.

В **заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. А именно, представлено исследование квазидвумерных систем в газоразрядной плазме высокочастотного емкостного разряда низкого давления. Экспериментально показано, что в приэлектродной области ВЧ-разряда возможно формирование как однородных квазидвумерных структур заряженных частиц так и с неизотропным распределением частиц в радиальном направлении: разреженных на периферии и более плотных в центре, и наоборот более плотные по краям и разреженным в центральной части. Показано, что, изменяя мощность разряда и/или давление плазмообразующего газа, можно влиять на радиальное распределение межчастичного расстояния в пылевом монослое и на однородность структуры.

В работе исследовано формирование течения в квазидвумерной плазменно-пылевой системе активных броуновских частиц при воздействии лазерного излучения. При этом, свойства поверхности частиц и их способность к поглощению лазерного излучения влияет как на динамические свойства самих частиц, так и на кинетику процесса развития пылевого течения. Экспериментально исследовано формирование течения для монослойных структур с различной степенью упорядоченности (параметром неидеальности). Чем больше параметр неидеальности в системе, тем выше пороговое значение мощности лазерного излучения, при котором возникает течение в структуре. Для частиц с поглощающей лазерное излучение поверхностью (с металлической оболочкой) при воздействии на часть структуры наблюдалось формирование не только направленного движения в этой области, но и кинетический разогрев всей структуры.

Было экспериментально исследовано формирование кластеров и протяженных квазидвумерных структур активных броуновских частиц с анизотропией свойств (т.н. Янус-частиц) и их динамики в плазме низкого давления. Экспериментально обнаружено, что при малых мощностях лазера характер движения таких частицы является преимущественно направленно-хаотическим. С ростом мощности лазерного излучения сперва наблюдается уменьшение их кинетической энергии, а затем заметный рост. Для малого кластера, состоящего из 19 частиц (2 оболочки), обнаружено, что с ростом мощности лазерного излучения наблюдается уменьшение их динамической энтропии. При этом с ростом кинетической энергии частиц фрактальная размерность для системы, ими образованной, уменьшалась. Это фактически означает, что повторяемость траекторий отдельных частиц уменьшается.

Экспериментально было исследовано формирование протяженных квазидвумерных структур из $\sim 10^3$ частиц и проведен анализ их динамических характеристик: траекторий, среднеквадратичного смещения, кинетической энергии. На основе анализа парных корреляционных функций, параметра неидеальности системы, топологических дефектов было изучено изменение упорядоченности структуры при различных значениях мощности лазерного излучения. Так, с увеличением мощности лазерного излучения от 0.05 Вт до 1.5 Вт наблюдался рост параметра неидеальности Γ^* в системе от 180 до 240 и уменьшение числа дислокаций и дисклинаций в системе.

Дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения с 1.5 до 4 Вт приводило к кинетическому разогреву пылевой структуры. При значении мощности лазерного излучения 2.5 Вт пропадало «расщепление» второго максимума парной корреляционной функции, что свидетельствует об исчезновении гексагональной кристаллической решетки и формировании жидкоподобной структуры.

Список источников

1. F. M. Trukhachev, R. E. Boltnev, **A. A. Alekseevskaya**, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov, Dust-acoustic waves in weakly-coupled (gaseous) cryogenic dusty plasma // *Physics of Plasmas* 2021, 28(9):093701; DOI:10.1063/5.0058560
2. Mikhail M. Vasiliev, Oleg F. Petrov, **Anastasiya A. Alekseevskaya**, Alexander S. Ivanov and Elena V. Vasilieva, Dynamic Effects of Laser Action on Quasi-Two-Dimensional Dusty Plasma Systems of Charged Particles // *Molecules* 2020, 25(15), 3375; <https://doi.org/10.3390/molecules25153375>
3. **Anastasiya A. Alekseevskaya**, Elena V. Vasilieva, Anatoly V. Filippov, Mikhail M. Vasiliev and Oleg F. Petrov, Isotropic and Anisotropic Monolayer Structures in RF Discharge Plasma // *Molecules* 2023, 28(7), 3259; <https://doi.org/10.3390/molecules28073259>
4. К. Г. Косс, И. И. Лисина, М. М. Васильев, **А. А. Алексеевская**, Е. А. Кононов, О. Ф. Петров, Фрактальное броуновское движение коллоидных частиц в плазме // *Физика плазмы*, 2023, Т. 49, № 1, стр. 33-41; DOI: 10.31857/S0367292122600972
5. Ф. М. Трухачёв, Р. Е. Болтнев, **А. А. Алексеевская**, М. М. Васильев, О. Ф. Петров, Нелинейные пыле-акустические волны в околоидеальной (газоподобной) криогенной пылевой плазме тлеющего разряда // *Физика плазмы*, 2023, Т. 49, № 1, стр. 85-9, DOI: 10.31857/S0367292122600923

6. O.F.Petrov, K.B.Statsenko, M.M.Vasiliev, Active Brownian motion of strongly coupled charged grains driven by laser radiation in plasma// Scientific Reports 2022
7. Gaspard P., Wang X.-J. // Phys. Rep. 1993. V. 235. P. 291-343.
8. Koss X.G., Kononov E.A., Lisina I.I., Vasiliev M.M., Petrov O.F. // Molecules. 2022. V. 27. 1614.
9. E.V.Vasilieva, O.F.Petrov, M.M.Vasiliev, Laser-induced melting of two-dimensional dusty plasma system in RF discharge// Scientific Reports 2021
10. Kyaw Arkar, Mikhail M. Vasiliev, Oleg F. Petrov, Evgenii A. Kononov, Fedor M. Trukhachev, Dynamics of Active Brownian Particles in Plasma// Molecules 2021

АЛЕКСЕЕВСКАЯ Анастасия Александровна

**АКТИВНЫЕ БРОУНОВСКИЕ ЧАСТИЦЫ И ИХ СТРУКТУРЫ В
ПЛАЗМЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА**

Автореферат

Подписано в печать		Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч. – изд.л. 1,5	Усл.-печ.л. 1,5
Тираж 100 экз.	Заказ №	Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2