

На правах рукописи

КОНОНОВ Евгений Александрович

**АКТИВНОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В
ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ**

1.3.9 - физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

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

Научный руководитель:	д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории диагностики пылевой плазмы ОИВТ РАН, ПЕТРОВ Олег Федорович
Официальные оппоненты:	д.ф.-м.н., проф., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), КАРАСЕВ Виктор Юрьевич;
	д.ф.-м.н., проф., ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), СУХИНИН Геннадий Иванович;
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Защита состоится « _____ » декабря 2022 г. в _____ ч. _____ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01), 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: jih.t.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 «_____»

2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)

к.ф.-м.н.

А.В.Тимофеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из примеров термодинамически открытых, диссипативных систем, часто встречающихся в окружающем мире – в космосе, в технологических процессах, является плазма, содержащая левитирующие заряженные микрочастицы. Плазму, в которой возможно формирование левитирующих пылевых структур, называют пылевой. Структуры могут формироваться из различных частиц, отличающихся по форме, составу и обладающими различными свойствами, что позволяет наблюдать широкий спектр эффектов. Частицы в плазме могут быть как пассивными, так и активными броуновскими, способными автономно преобразовывать доступную энергию среды (химическую, электромагнитную, тепловую и т.д.) в собственное механическое движение. Изменение состояния плазменно-пылевых систем, сформированных из пассивных броуновских частиц, возможно только при варьировании параметров окружающей их среды (изменение параметров газового разряда). В то же время изменение состояния систем из активных броуновских частиц возможно в результате изменения кинетической температуры частиц в результате внешнего воздействия (лазерного излучения) при неизменных параметрах среды. Воздействие такой активной среды как плазма может приводить к изменению свойств макрочастиц, в результате чего их поведение в структуре может кардинально меняться: пассивные броуновские частицы могут стать активными, в результате чего такие структуры могут проявлять активные свойства, а также способность к самоорганизации при внешних воздействиях.

Сферы применения активных броуновских частиц разнообразны: например, разрушение вредных веществ в окружающей среде, контроль потоков вещества в миниатюрных устройствах типа «lab-on-a-chip», целевая доставка лекарства или микроустройства к больным органам. При разработке каталитических нано- и микромоторов необходима информация о способах управления их движением, равно как и о влиянии формы и материала поверхности частиц на их коллективное поведение.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное изучение активного броуновского движения частиц, формирующих упорядоченные структуры в газоразрядной плазме, в том числе при температурах сверхтекучего гелия.

Поставлены и решены следующие задачи:

1) Исследование модификации поверхности макрочастиц, а именно формирования металлического покрытия, после их экспозиции в приэлектродной области высокочастотного (ВЧ) разряда емкостного типа. Модернизация экспериментального стенда для захвата частиц из структуры, левитирующей над электродом. Проведение анализа поверхности и состава частиц, размещенных на электроде и в пылевой структуре.

2) Исследование характера движения полимерных частиц с модифицированной поверхностью в монослое при воздействии лазерного излучения. Проведение сравнения линейного смещения до изменения направления движения и отклонения от направления движения макрочастиц при различных значениях мощности лазерного излучения. Поиск механизмов активности частиц с модифицированной поверхностью.

3) Анализ структурных характеристик для плазменно-пылевой системы из модифицированных полимерных частиц при воздействии лазерного излучения.

4) Исследование характера движения активных броуновских частиц в цепочечной структуре в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Анализ структурных характеристик для цепочечной структуры при различных значениях мощности лазерного излучения.

5) Исследование плазменно-пылевых структур в тлеющем разряде гелия в газоразрядной трубке, охлаждаемой сверхтекучим гелием при температуре 1.6 К и выше.

Научная новизна работы

Модернизирован экспериментальный стенд для захвата частиц из плазменно-пылевой структуры, левитирующей в плазме высокочастотного разряда.

Впервые экспериментально исследована модификация частиц, левитирующих в пылевой структуре в плазме высокочастотного разряда, а именно формирование металлического покрытия.

Предложена и апробирована методика модификации частиц, расположенных на электроде, в плазме высокочастотного разряда. Данный подход применен для создания нового объекта исследования – янус-частиц.

Впервые экспериментально изучен характер движения частиц с модифицированной поверхностью в плазменно-пылевой структуре и их активные свойства в широком диапазоне мощности воздействующего лазерного излучения.

Впервые экспериментально изучены структурные характеристики плазменно-пылевой системы из модифицированных частиц в широком диапазоне мощности воздействующего лазерного излучения.

Показано наличие структурного перехода «кристалл-жидкость» в плазменно-пылевой структуре модифицированных частиц при воздействии лазерного излучения.

Предложено объяснение структурного перехода и возникновения активных свойств частиц с модифицированной поверхностью при воздействии лазерного излучения с учетом роли фотофоретической силы в движении макрочастиц.

Показано, что металлические частицы проявляют активные свойства в плазме тлеющего разряда постоянного тока и их активность растет с увеличением мощности лазерного излучения, приводя к структурному переходу с обменом фрагментами цепочек внутри цепочечной структуры.

Впервые экспериментально исследованы плазменно-пылевые структуры в тлеющем разряде гелия в трубке, охлаждаемой сверхтекучим гелием при температуре 1.6 К и выше.

Предложено объяснение возникновения второй и третьей компонент мультимодальной пылевой плазмы – облака наночастиц и волокон – как результат распыления материала диэлектрической вставки, используемой для концентрации потока электронов на оси разрядной трубки.

Научная и практическая значимость работы

Исследования затрагивают сразу несколько областей науки, такие как: физика пылевой и низкотемпературной плазмы, физика газового разряда, химия полимеров и материаловедение. Представленные в данной работе результаты экспериментальных исследований могут оказаться полезными широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся созданием новых конструкционных и функциональных материалов, изучением свойств активных коллоидных систем и разработкой приложений, связанных с их использованием.

Модификация приводит к развитию у частиц уникальных функциональных свойств поверхности и состава, которые могут быть использованы как в медицинских и технических целях (адресная доставка лекарств и создание порошковых основ для композитных материалов), так и в научных (создание активных янус-частиц для изучения самоорганизации в коллоидных и плазменно-пылевых системах).

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика формирования металлического покрытия на поверхности макрочастиц в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда.
2. Результаты экспериментального изучения броуновского движения макрочастиц с модифицированной поверхностью в плазме высокочастотного разряда при лазерном воздействии.
3. Результаты экспериментального изучения лазерно-индуцированного структурного перехода «кристалл-жидкость» в монослое активных броуновских частиц при их модификации в плазме высокочастотного разряда.
4. Результаты экспериментального изучения структурного перехода в цепочечной структуре из активных броуновских частиц в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения.

5. Результаты экспериментального изучения структурных изменений многокомпонентной криогенной пылевой структуры, сформированной из макрочастиц в окружении синтезированных полимерных наночастиц и волокон, в диапазоне температур 1.6 - 2 К.

Степень достоверности 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.

Результаты исследований докладывались на международных и всероссийских научных конференциях с международным участием: X International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology» (PPPT-10): September 12-16, 2022, Minsk, Belarus; 9th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas (ICPDP 2022), Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia, May 23–27 2022; 18th International Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation (CSCPIER-2022), Moscow, Russia, April 11-13, 2022; XXXVII Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2022), Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, 1–6 March 2022; 17th Physics of Nonideal Plasmas Conference. Dresden, Germany. September 20-24, 2021; XXXV International Conference on Equations of State for Matter, March 1–6, 2020, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia; 64-я научная Всероссийская конференция МФТИ (г. Долгопрудный, 2021); 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23 - 29 ноября 2020; XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia, March 1–6, 2019; 61-ая Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, 19– 25 ноября 2018; 60-я Научная конференция МФТИ, Москва - Долгопрудный - Жуковский, 20–26 ноября 2017 г.

Исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантом РФФИ № 20-32-90039, стипендией Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых СП-5688.2021.1.

Публикации

По теме исследований опубликованы 9 научных работ в ведущих зарубежных и российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (список публикаций приведен в конце автореферата).

Личный вклад автора работы

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 активно участвовал в совместных обсуждениях и подготовке рукописей к публикации.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и библиографии. Общий объем работы составляет 106 страниц, включая 34 рисунка, 3 таблицы и список цитируемой литературы, содержащий 153 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается общая характеристика диссертации: обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов; сформулированы цели 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 активном броуновском движении частиц в коллоидных средах, в том числе пылевой плазме, необходимая для понимания содержания диссертационной работы.

В **разделе 1.1** приведено определение активного броуновского движения частиц, даны критерии оценки такого движения. Так активные броуновские частицы могут получать энергию извне и преобразовывать её в кинетическую энергию собственного движения. В частности, охарактеризовать расстояние, пройденное частицей по направленной прямолинейной траектории до

преобразования движения в случайно направленное можно линейным смещением L (англ. persistence length):

$$L = \frac{v}{D_R} = v\tau_R, \quad (1)$$

где v – средняя скорость частицы, D_R – коэффициент вращательной диффузии, τ_R – характерное время вращательной диффузии.

В **разделе 1.2** кратко описаны виды активных броуновских частиц. Часто предпочтительное направление движения для активных частиц (например, биологических агентов) задает их пространственная конфигурация (голова-хвост), присущая высшим организмам. В отличие от природных организмов, искусственно созданные активные броуновские частицы обычно не имеют движущихся частей и вместо этого взаимодействуют с окружающей средой и преобразованием полученной энергии в движение. Также предпочтительное направление движения может определяться движущим механизмом, что можно наблюдать для искусственных активных частиц, таких как химически активные коллоиды. Таким образом активные броуновские частицы, можно разделить по структурному типу – изотропные макрочастицы и янус-частицы, а по происхождению – на живые, неживые естественного происхождения и искусственные.

Раздел 1.3 посвящен описанию мирового научного опыта по проблеме механизмов активного броуновского движения. Рассмотренные механизмы активности могут основываться на: химических реакциях, акустических колебаниях, эффекте Марангони, воздействии электрических и магнитных полей и воздействии излучения. В качестве примеров приведены различные экспериментальные ситуации, в ходе которых наблюдались различные неравновесные процессы в системах активных броуновских частиц: образование, изменение и разрушение структур, коллективное движение.

В **разделе 1.4** представлено краткое описание основного объекта исследования диссертации – пылевой плазмы и пылевых макрочастиц. Рассмотрена роль явления активности в процессах самоорганизации плазменно-пылевых структур. Выделен фотофоретический механизм активности в результате разогрева макрочастиц лазерным излучением, позволяющий

наблюдать структурные переходы «кристалл-жидкость». Также отмечена возможность изменения состояния макрочастиц во время пребывания в плазменной среде.

Во **второй главе** представлены результаты экспериментального изучения лазерно-индуцированного активного броуновского движения макрочастиц как результат их модификации в плазме высокочастотного емкостного разряда.

В **разделе 2.1** описана модификация поверхности макрочастиц в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда, отраженная в работе [1]. Действие такой активной среды, как плазма, может привести к развитию уникальных свойств у макрочастиц. В результате их поведение в плазменно-пылевой системе может резко измениться: пассивные броуновские частицы могут стать активными, что может вызвать различные явления, такие как структурные переходы, кластеризация и т.д.

В **пункте 2.1.1** приведено подробное описание экспериментальной установки, средств диагностики и условий экспериментов. Для захвата частиц из плазменно-пылевой структуры, левитирующей в плазме высокочастотного разряда была проведена модернизация стенда (см. **рис. 1**): в нижнем алюминиевом электроде сделано отверстие диаметром 71 мм, в которое вставлялась сетка с квадратными ячейками со стороной 2.4 мм. Под нижним электродом на специальном держателе находился выдвижной столик, на который улавливались пылевые частицы из структуры после отключения разряда. Кроме того, на верхнем электроде была закреплена пластина с размещенными на ней частицами.

Генерация плазмы осуществлялась при давлении буферного газа – аргона 5 Па, при мощности $W_{load} = 15$ Вт, при этом отраженная мощность составляла $W_{ref} = 4$ Вт. Неизменные свойства плазмы поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 2 стандартных см³/мин. В экспериментах использовались два типа монодисперсных сферических меламин-формальдегидных (МФ) частиц: диаметром 10.6 ± 0.1 мкм без покрытия и диаметром 10.0 ± 0.2 мкм с медным покрытием (толщина покрытия ≈ 200 нм). Для анализа макрочастиц использован сканирующий электронный микроскоп

(РЭМ), а элементный состав исследуемого материала определялся с помощью рентгеноспектрального микроанализа.

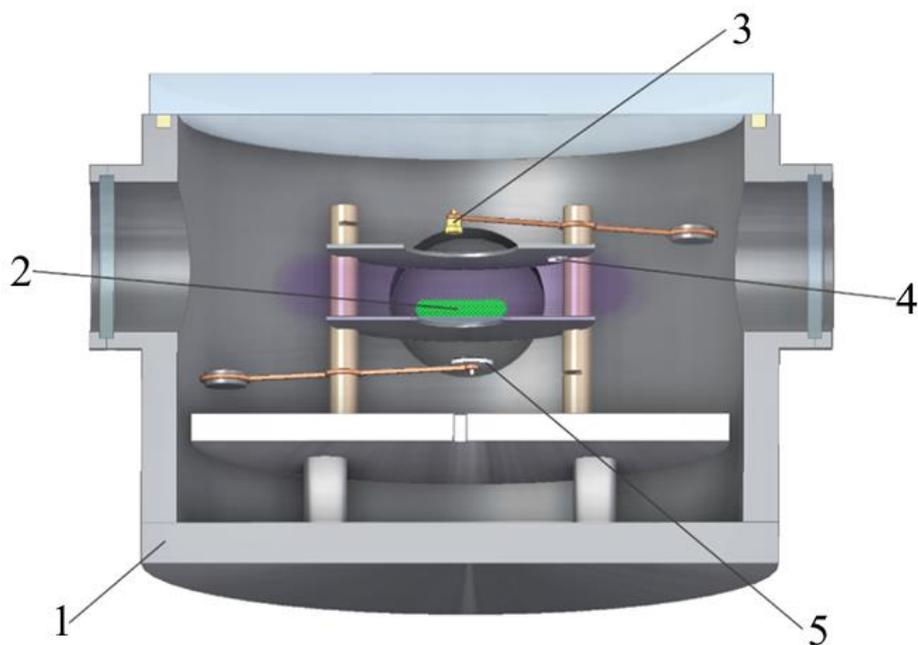


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – экспериментальная камера; 2 – плазменно-пылевая структура над сеткой; 3 – контейнер с частицами; 4 – пластина с частицами на электроде; 5 – выдвижное устройство для улавливания частиц.

В пункте 2.1.2 описаны результаты исследования модификации частиц, а именно формирования металлического покрытия при их экспозиции в плазменно-пылевой структуре, левитирующей в приэлектродном слое ВЧ-разряда. Экспериментально установлено, что состав и структура поверхности частиц изменяются: на их поверхности осаждаются металлы, и после 30 мин воздействия или более появляется островковое металлическое покрытие. Элементный анализ поверхности макрочастиц показал (см. **рис. 2**), что в составе поверхности уловленных частиц появились металлы, источником которого являются электроды и другие металлические поверхности, подвергающиеся распылению низкоэнергетическими ($E \sim 100$ эВ) ионами плазмообразующего газа.

Зависимость на **рис. 2** отражает, что металлы начинают осаждаться на поверхности частиц уже через 1 мин воздействия, и их количество увеличивается со временем, при этом изменение элементного состава поверхности нелинейно во времени.

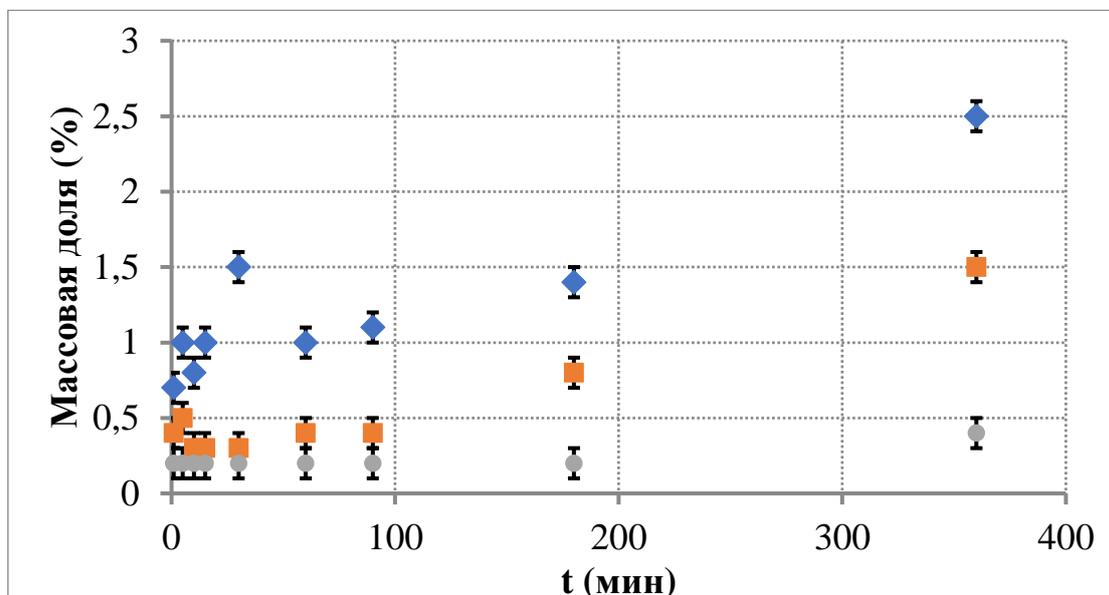
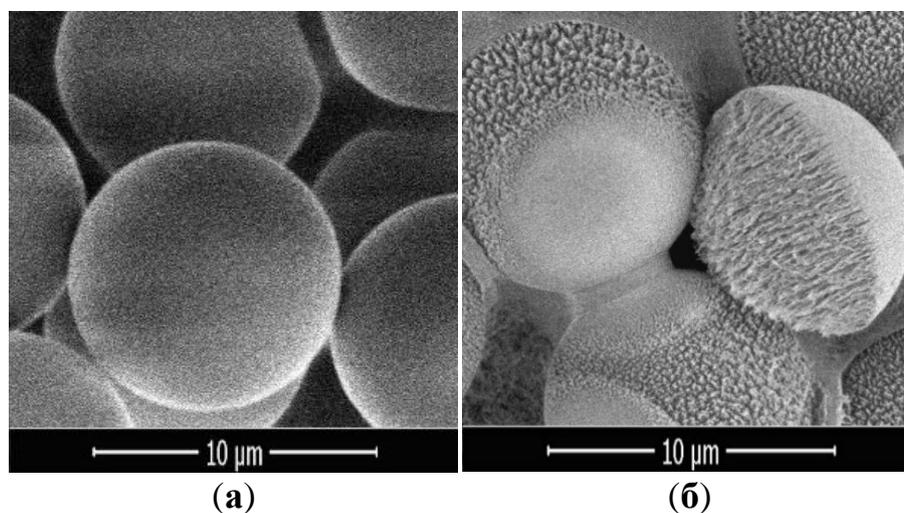


Рис. 2. Массовая доля элементов различных типов металлов на поверхности частиц МФ, левитирующих в плазменно-пылевой системе, при различном времени экспозиции. ● – для Al, ■ – для Cu, ◆ – для Fe.

В пункте 2.1.3 представлены результаты исследования модификации поверхности макрочастиц, находившихся на электроде. Для частиц, собранных с электрода, непокрытые частицы подвергаются эрозии, в результате чего на поверхности, обращенной к плазме, могут образовываться игольчатые структуры осажденных металлов, а форма макрочастиц может меняться (см. рис. 3). В то же время на поверхности частиц с медным покрытием образуются столбчатые структуры, состоящие из продуктов эрозии электрода. Результаты исследований по формированию модифицированного покрытия полимерных частиц использованы в работах [2-5].



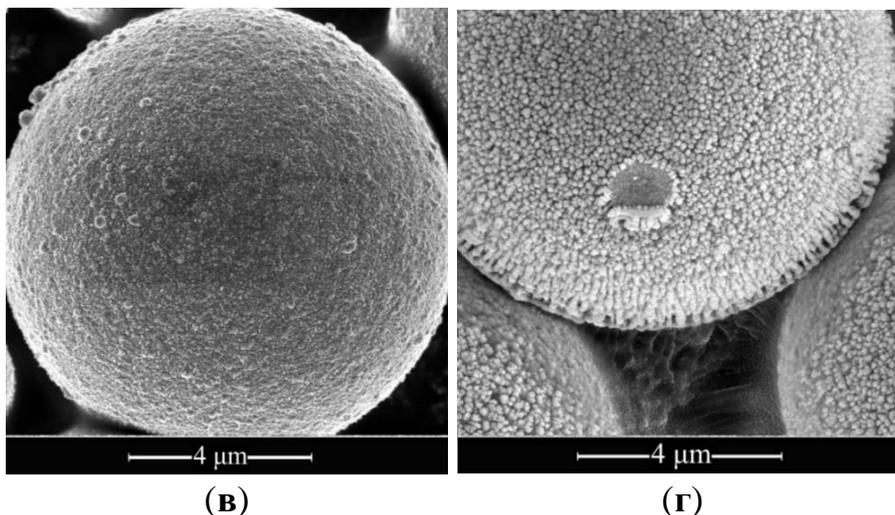


Рис. 3. РЭМ-изображения частиц МФ без покрытия (верхний ряд) и с медным покрытием (нижний ряд): (а,в) – исходные частицы до плазменной обработки; (б,г) – частицы после 6 ч плазменной обработки, расположенные на электроде.

В разделе 2.2 описано броуновское движение модифицированных макрочастиц, формирующих квазидвумерную пылевую структуру, при воздействии лазерного излучения различной интенсивности, отраженное в работе [4].

В пункте 2.2.1 приведено подробное описание экспериментальной установки, средств диагностики и условий эксперимента. Генерация плазмы осуществлялась при давлении буферного газа – аргона 5 Па, при мощности 13 Вт, при этом отраженная мощность составляла 2.5 Вт. Неизменные свойства плазмы поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 3 стандартных см³/мин. Для формирования структуры использовались частицы без покрытия, описанные в пункте 2.1.1. Для визуализации и воздействия на полученную структуру использовался аргоновый газоразрядный лазер, пучок которого был сформированным в «лазерный нож». Площадь пучка лазерного излучения в области структуры составляла 8.75 см². Изменение характера движения макрочастиц регистрировалось высокоскоростной видеокамерой с частотой съемки 200 кадр/с.

В пункте 2.2.2 приведен анализ характера движения модифицированных пылевых частиц при воздействии лазерного излучения различной интенсивности. Для этого рассматривались такие характеристики как траектории, среднее квадратичное смещение $\langle r^2 \rangle$ и линейное смещение L (см.

раздел 1.1) движущихся макрочастиц в монослое. Обнаружено, что динамика движения модифицированных частиц МФ в монослое изменяется при различной интенсивности лазерного излучения и соответствует трем режимам (см. **рис. 4**): удержание ловушкой, броуновское движение и комбинированное направлено-случайное движение, состоящее из лазерно-индуцированного (фотофорез) и броуновского движения, что согласуется с наблюдаемыми траекториями движения макрочастиц. Экспериментально установлено, что при увеличении мощности воздействующего лазерного излучения на монослой величина линейного смещения до изменения направления движения макрочастиц растет, в то время как отклонение от направленного движения остается постоянным и в пределах погрешности равно 0. Сделан вывод, что модифицированные в объеме плазмы частицы являются активными броуновскими и их активность растет при увеличении интенсивности воздействующего лазерного излучения.

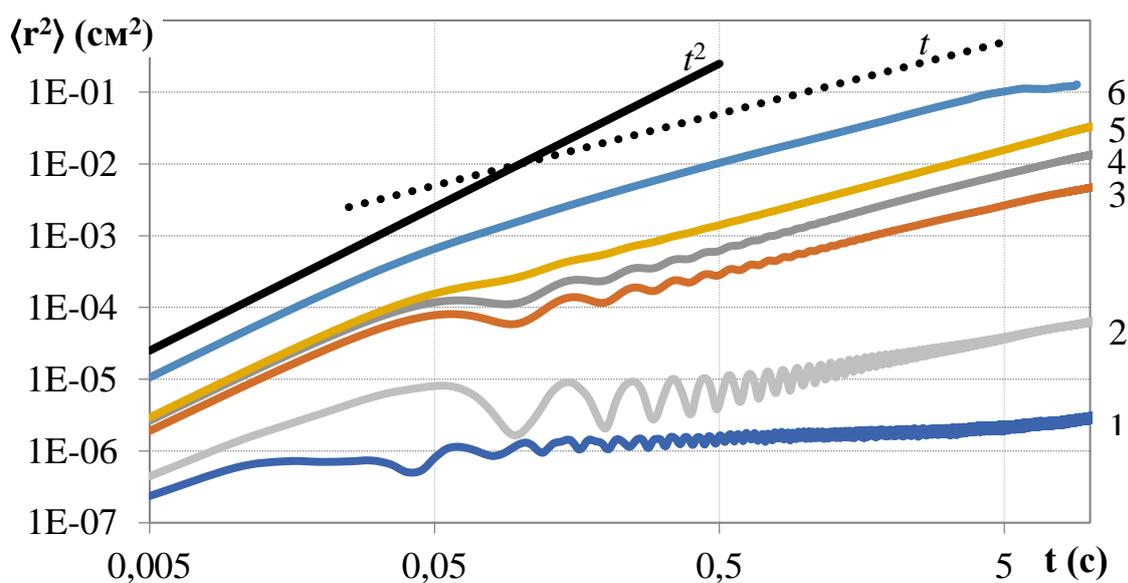


Рис. 4. Изменение среднеквадратичного смещения $\langle r^2 \rangle$ движущихся макрочастиц в монослое от времени при различных значениях мощности лазерного излучения: 1 – $W_{\text{las}} \approx 0.6$ Вт; 2 – $W_{\text{las}} \approx 0.8$ Вт; 3 – $W_{\text{las}} \approx 1.4$ Вт; 4 – $W_{\text{las}} \approx 1.9$ Вт; 5 – $W_{\text{las}} \approx 3.1$ Вт; 6 – $W_{\text{las}} \approx 7.2$ Вт.

В **разделе 2.3** описаны структурные переходы в монослое модифицированных частиц при воздействии лазерного излучения различной интенсивности, отраженные в работе [5].

Пункт 2.3.1 содержит результаты анализа изменения состояния монослоя, получение которого описано в **пункте 2.2.1**. Для этого рассматривались такие

характеристики как эффективный параметр неидеальности Γ^* , общие средние кинетические энергии макрочастиц в монослое и парные корреляционные функции структуры для каждого значения интенсивности лазерного излучения. Зафиксирован рост кинетической энергии модифицированных частиц от $E_k \sim 1$ эВ до $E_k \sim 121$ эВ, возникающий при повышении интенсивности воздействия лазерного излучения. При этом обнаружено уменьшение степени упорядоченности монослоя (см. **рис. 5**), наблюдался структурный переход «кристалл – жидкость».

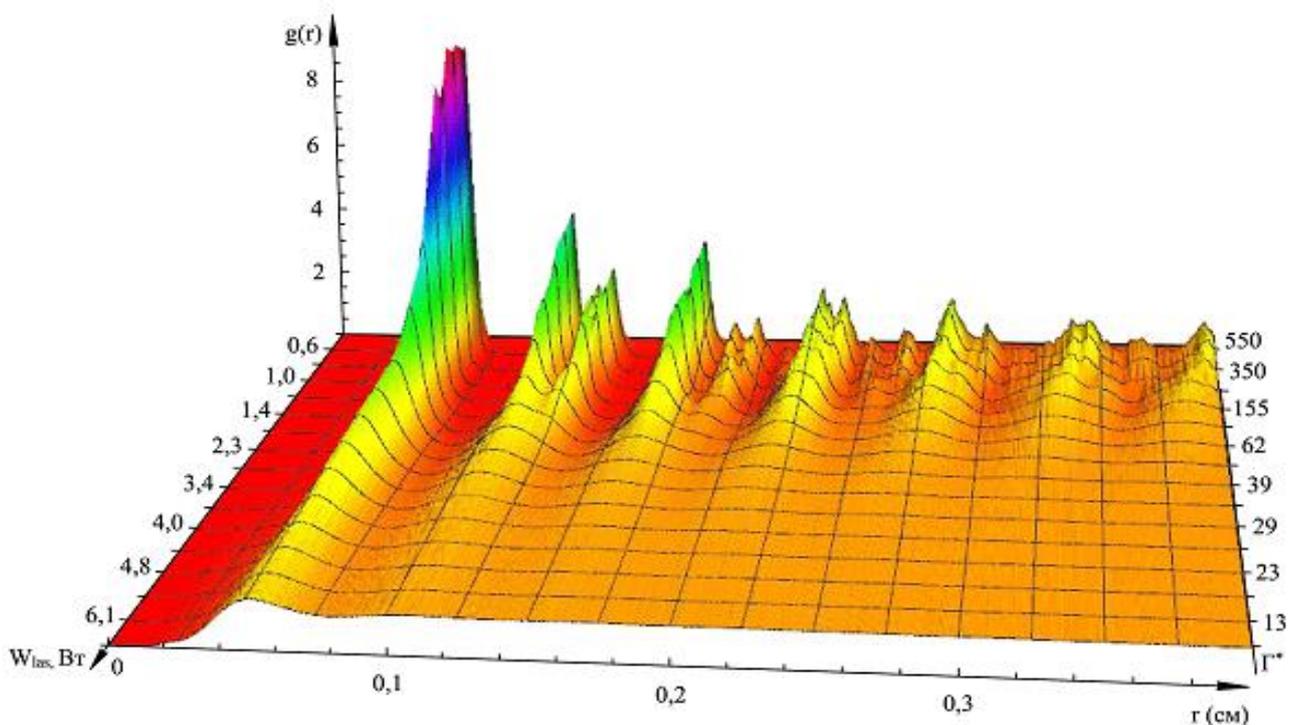


Рис. 5. Парная корреляционная функция плазменно-пылевой структуры после выдержки частиц в плазме в течение 90 минут при различных значениях мощности лазерного излучения. Для характерных корреляционных функций указаны соответствующие мощность лазерного излучения и эффективный параметр неидеальности Γ^* .

В **пункте 2.3.2** проведена оценка скорости изменения температуры модифицированных пылевых частиц при воздействии лазерного излучения интенсивностью ≈ 0.1 Вт/см² за 1 с. Согласно расчетам, лазерное излучение может приводить к нагреву пылевых частиц со скоростью ~ 1 К/с. Сделан вывод, что наблюдавшееся увеличение кинетической энергии пылевых частиц при увеличении мощности лазерного излучения может быть связано с

возникновением существенной фотофоретической силы, вносящей вклад в движение частиц.

Раздел 2.4 содержит выводы к Главе 2.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при различных температурах буферного газа.

В **разделе 3.1** описаны структурные переходы в цепочечной системе активных броуновских частиц при внешнем воздействии, отраженные в работе [6].

В **пункте 3.1.1** приведено подробное описание экспериментальной установки, средств диагностики и условий эксперимента. Эксперименты с разрядом постоянного тока проводились в вертикально ориентированной стеклянной трубке, внутренний диаметр которой составлял 40 мм, а длина - 450 мм. Генерация плазмы осуществлялась при давлении буферного газа – неона 16.7 Па, напряжение 1.8 кВ и сила тока 0.4 мА. Неизменные свойства плазмы поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 0.4 стандартных см³/мин. Для формирования цепочечной структуры использовались полидисперсные медные частицы со средним диаметром 2.5 мкм. Для визуализации и воздействия на полученную цепочечную структуру использовался однородный расширенный пучок твердотельного лазера, площадь пучка составляла 7.1 см². Движение пылевых частиц регистрировалось в вертикальной плоскости при помощи высокоскоростной видеокамеры с частотой видеосъемки 200 кадр/с и пространственным разрешением 13.2 мкм/пикс.

В **пункте 3.1.2** представлены результаты анализа траекторий, среднего квадратичного смещения и динамической энтропии для каждой микрочастицы в цепочечной структуре, а также линейного смещения до изменения направления движения и отклонения от него.

Для вычисления динамической энтропии используется простое приближение, которое легко можно применять для анализа экспериментов и численного моделирования – динамическая энтропия первого пересечения (MFPT dynamic entropy) [2]. При условии, что пространственный масштаб

(параметр огрубления) не слишком мал, динамическую энтропию можно приближенно подсчитать, описав в начальный момент времени вокруг частицы сферу радиуса, равного параметру огрубления, с центром в точке нахождения частицы, а затем, определив момент времени τ , в который траектория впервые достигнет заданного порогового значения ε . Обратное «время первого пересечения» и будет равным динамической энтропии первого пересечения $S(\varepsilon) \equiv 1/\tau(\varepsilon)$.

При мощности лазерного излучения до 225 мВт динамическая энтропия цепочечной структуры представляет собой два «пучка», соответствующие верхней части, где частицы уединены, и нижней части, содержащей несколько цепочек (см. **рис. 6а**). При увеличении мощности лазера до 380 мВт частицы выходили из своих потенциальных ям и начинали двигаться внутри оболочек цепочечных структур, при этом «пучки» динамической энтропии начинают сливаться в один (**рис. 6б**). При дальнейшем повышении мощности лазерного излучения до 980 мВт цепочки начинали «обмениваться» частицами, «пучок» динамической энтропии при значениях параметра огрубления от 0.01 до 0.1 имеет перегиб (**рис. 6в**).

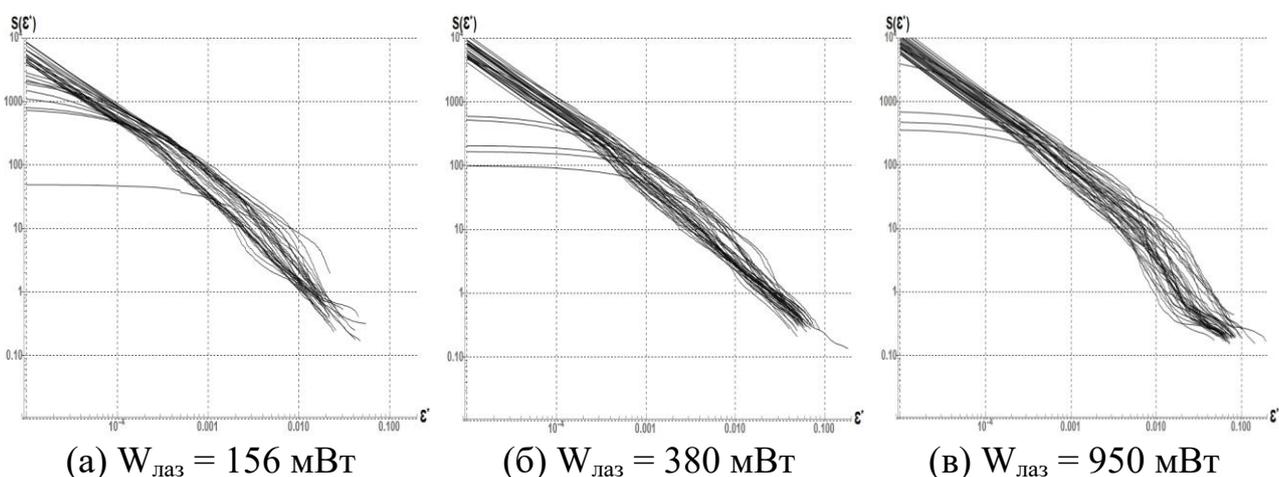


Рис. 6. Динамическая энтропия каждой частицы в цепочечной структуре при различной мощности лазерного излучения.

В результате анализа среднего квадратичного смещения выявлено, что динамика движения частиц в цепочечной структуре изменяется при различной мощности лазерного излучения и соответствует трем режимам: удержание ловушкой, броуновское движение и комбинированное направлено-случайное

движение, состоящее из лазерно-индуцированного (фотофорез) и броуновского движения, что согласуется с результатами анализа динамической энтропии.

Установлено, что при увеличении интенсивности воздействующего лазерного излучения линейное смещение, т.е. активность макрочастиц растет и имеет максимум при мощности 380 мВт. Однако, при дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения активность макрочастиц уменьшается до первоначальных значений и выходит на плато, что можно объяснить затратами энергии макрочастиц на преодоление потенциального барьера и перескоки внутри цепочечной структуры. Сделан вывод, что частицы меди в цепочечной структуре являются активными броуновскими частицами, их активность изменяется по мере увеличения мощности лазерного излучения, приводя к структурному переходу с обменом фрагментами цепочек.

В разделе 3.2 описаны явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме, отраженные в работах [7-9].

В пункте 3.2.1 приведено подробное описание экспериментальной установки, средств диагностики и условий эксперимента. Установка для исследования плазменно-пылевых структур при температуре жидкого гелия была разработана на основе оптического криостата Janis SVT-200. Эксперименты с разрядом постоянного тока проводились в вертикально ориентированной стеклянной трубке, помещенной во внутренний канал криостата. Внутренний диаметр трубки составлял 20 мм, а расстояние между электродами - 600 мм. Давление газообразного гелия в разрядной трубке измерялось с помощью конвектора Granville-Phillips 275. Для измерения температуры в криостате использовались два температурных датчика: диодный с диапазоном измерений от 1.4 до 500 К, располагался рядом с нижним концом разрядной трубки. Второй, калиброванный полупроводниковый с диапазоном измерений от 1.5 до 60 К, был закреплен на внешней поверхности разрядной трубки на высоте формируемой плазменно-пылевой структуры.

Генерация плазмы осуществлялась при давлении гелия 4 – 6 Па, напряжении 3.2 кВ и сила тока 20-30 мкА. В этих условиях было возможным охлаждать разрядную трубку сверхтекучим гелием с температурой в пределах от

1.6 до 2.17 К. Для формирования плазменно-пылевых структур использовались полидисперсные частицы CeO_2 (размером от 0.1 мкм до 100-200 мкм). Для изучения явлений в плазменно-пылевых структурах при криогенных температурах была разработана и изготовлена специальная вставка в криостат, стабилизирующая положение страты на уровне оптических окон. Движения пылевых частиц в плазменной структуре отслеживались высокоскоростной видеокамерой с частотой до 300 кадров/с. Плазменно-пылевые структуры освещались лазерным "ножом" (высотой 8 мм и шириной 0.22 мм), который генерировался с помощью непрерывного твердотельного лазера мощностью до 85 мВт на длине волны 532 нм.

В пункте 3.2.2 описаны структурные характеристики полученных плазменно-пылевых структур и их самоорганизация при температуре сверхтекучего гелия. Эволюция плазменно-пылевой структуры в диапазоне температур от 1.63 до 2.16 К показана на **рис. 7**. Формирование сфероидальной пылевой структуры наблюдалось при инъекции частиц диоксида церия в газовый разряд в трубке, охлаждаемой сверхтекучим гелием при температуре 1.63 К (**рис. 7а**). Размер структуры варьировался от 2 до 5 мм, среднее межчастичное расстояние в структуре, l_{ip} , составляло 120 ± 15 мкм. Облако наночастиц появилось в поле зрения примерно через 1000 с после зажигания тлеющего разряда (**рис. 7б**) и совершало коллективные колебательные движения. Установлено, что частота колебаний снизилась с 48 Гц до 20 Гц при увеличении температуры с 1.69 К до 2.0 К при давлении ≈ 4 Па. В то же время скорость волны уменьшилась с 16.8 до 7.4 мм/с, а длина волны осталась неизменной и составила 0.37 ± 0.03 мм. После появления облака частиц, с задержкой в несколько минут, в области формирования пылевой структуры наблюдалось появление отдельных волокон, длиной \sim от 0.1 до 1 мм (**рис. 7с**). Короткие волокна длиной ~ 0.1 мм быстро вращались со скоростью не менее 100 оборот/с.

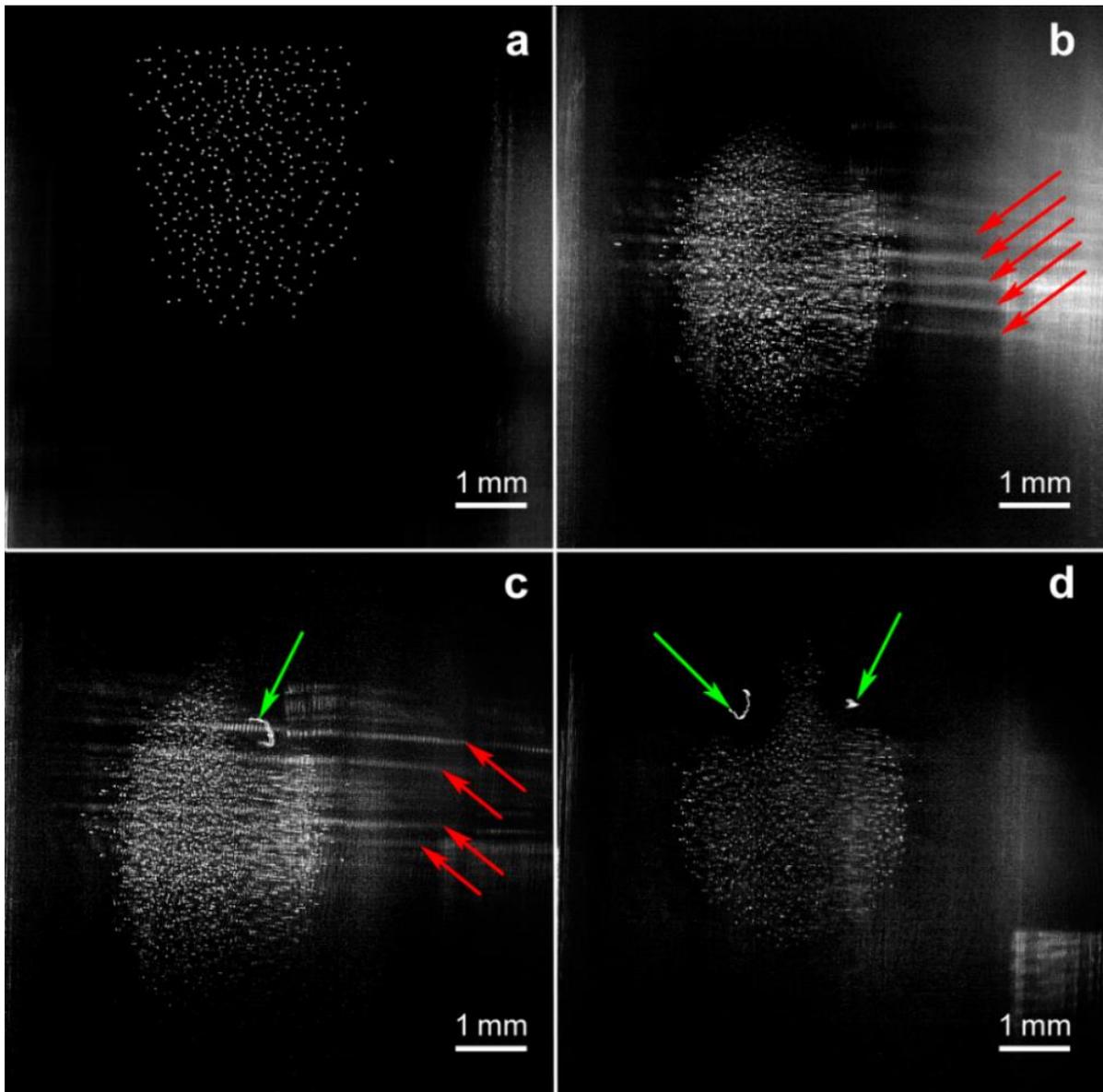


Рис. 7. Трансформация плазменно-пылевой структуры в диапазоне температур от 1.63 до 2.16 К: а) структура, образованная частицами CeO_2 при 1.63 К; б) структура и волны в облаке полимерных наночастиц, $T = 2.0$ К, красные стрелки указывают на волны плотности в облаке наночастиц; в) структура, состоящая из частиц CeO_2 , облака полимерных наночастиц и волокон, $T = 2.0$ К, зеленая стрелка указывает на волокна; д) пустоты вокруг волокон, левитирующих внутри пылевой структуры, сформированной частицами CeO_2 , $T = 2.16$ К.

Зафиксировано отсутствие в облаке наночастиц войдов вокруг волокон (**рис. 3.7в**), тогда как они хорошо заметны в плазменно-пылевой структуре (**рис. 3.7д**). Волокна обычно левитировали на одной высоте относительно центра сфероидальной структуры. Облако наночастиц наблюдалось в диапазоне температур 1.6-2 К. Волокна были видны в поле зрения вплоть до температуры 4.4 К. Облако наночастиц наблюдалось более 15 мин в узком температурном

диапазоне, от 1.6 до 2.17 К, т. е. до момента перехода жидкого гелия, охлаждающего разрядную трубку, в нормальное состояние.

При разрушении плазменно-пылевой структуры при 9.8 К из-за выключения разряда микроскопические частицы отбрасывались затухающим электрическим полем на стенки трубки. Частицы и волокна, осевшие на стенке трубки, были собраны с помощью углеродной ленты и исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного (EDX) микроанализа (см. **рис. 8**). Было установлено, что частицы оксида церия, собранные со стенок трубки, имеют более узкое распределение по размерам (от 1 до 20-30 мкм) по сравнению с первоначальным широким распределением полидисперсных частиц (от 0.1 до ~100 мкм). Вычислено эффективное значение заряда, Z_d , для одной частицы диаметром 1 мкм $\approx 250e$, где e - элементарный заряд, 1.6×10^{-19} Кл. На основе этого значения заряда был оценен параметр неидеальности Γ :

$$\Gamma = E_c / E_k = 1 / (4\pi\epsilon_0) \times (Z_d \times e)^2 / (E_k \times l_{ip}) \quad (2)$$

где ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость. Получено значение $\Gamma \approx 20$, хорошо согласующееся с наблюдаемой жидкоподобной плазменно-пылевой структурой. Проведена оценка плотностей электронов и положительных ионов в квазинейтральной комплексной плазме, $n_e, n_i \sim n_d \times Z_d \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Волокна представляют собой эластичные спиралевидные ленты шириной от 12 до 22 мкм и толщиной 2-5 мкм (см. **рис. 8**). Удельная масса волокна была оценена и составила 0.2 мкг/мм при условии, что удельный вес волокна составляет около 1 г/см³. Таким образом, удельный заряд, необходимый для левитации волокна, должен составлять $\approx 7 \times 10^6 \text{ e/мм}$. При большом оптическом увеличении на поверхности волокна видны небольшие выпуклости (см. **рис. 8c,d**) диаметром от 10 до 100 нм, предположительно соответствующие наночастицам в облаке. Ввиду малых размеров и отсутствия пустот вокруг волокон, левитирующих в облаке наночастиц, определен электрический заряд наночастиц, $\sim e$.

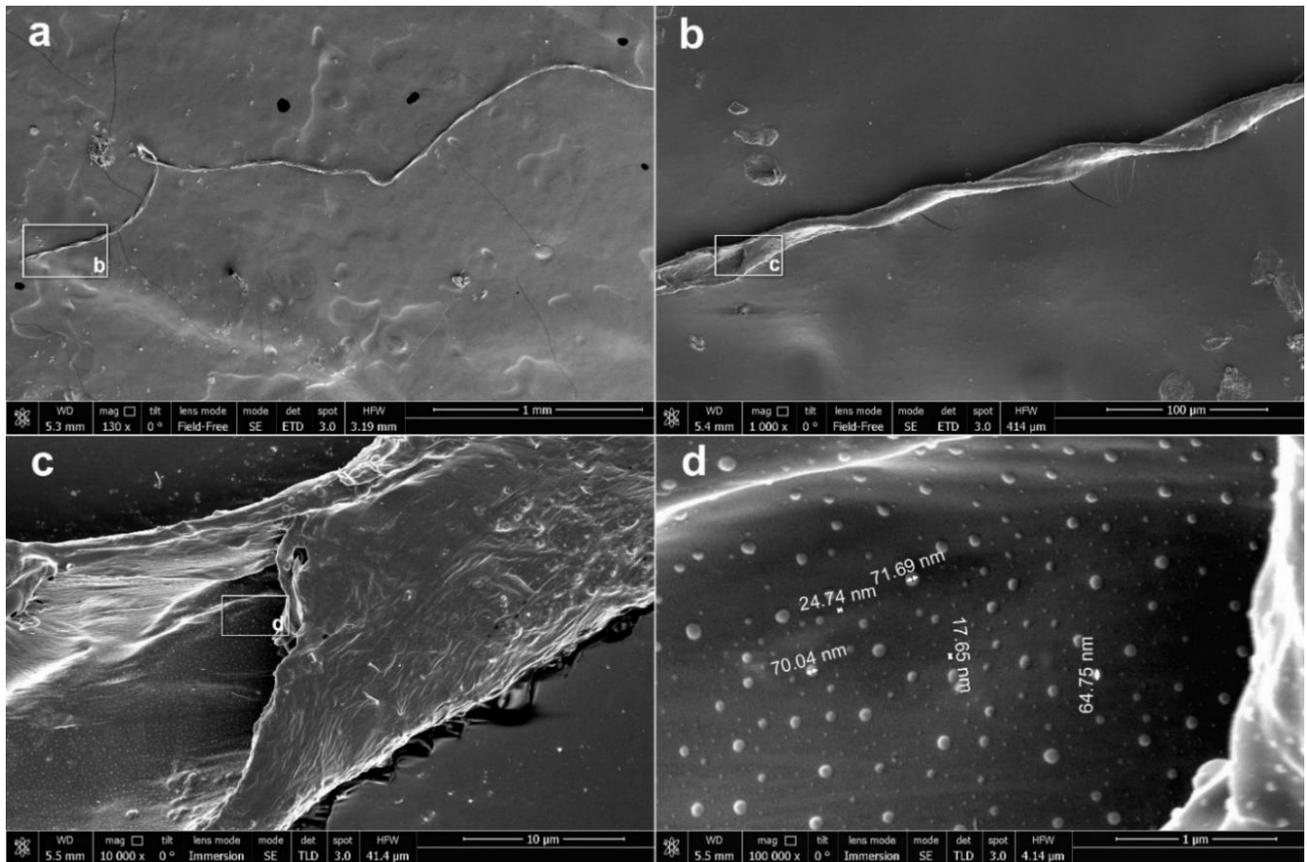


Рис. 8. РЭМ микрофотографии спирального волокна, полученные при различных увеличениях: а) $\times 130$; б) $\times 1000$; в) $\times 10000$; д) $\times 100000$. Белая рамка соответствует области, показанной на последующей микрофотографии.

В пункте 3.2.3 представлен анализ состава волокон, предложен способ формирования волокон и наночастиц в криогенной газоразрядной плазме. Состав волокон приведен в табл. 1 и сравнен с составом диэлектрического конуса, изготовленного из глины DAS (материал для моделирования, воздушного отвердевания). Химический состав нанокластеров не исследовался из-за их малого размера (рис. 8d). Сделан вывод, что интенсивное распыление диэлектрического конуса, используемого для стабилизации положения самого нижнего слоя в положительном столбе тлеющего разряда, происходит за счет электронов и ионов, сфокусированных в небольшое отверстие в верхней части вставки. Распыление твердой полимерной мишени при комнатной температуре может привести к выделению летучих фрагментов макромолекул, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве прекурсоров для плазменной полимеризации, различные полимерные фрагменты могут образовывать различные структуры.

Табл. 1. Химический состав глины и волокон.

Глина		Волокно	
Элемент	Ат. вес, %	Элемент	Ат. вес, %
O	61	O	30
C	14	C	61
Mg *	11		
Si	9	Si	8
Al *	3		
S *	1		
Ca *	1		
		Ce **	1

* - содержание Mg, Al, S и Ca в волокнах составляло ~ 0.1 %.

** - присутствие церия в волокнах может быть объяснено адсорбцией частиц оксида церия на поверхности волокон. Некоторые другие химические элементы (Na, K, Cl) были обнаружены в глине и в волокнах как примеси на уровне ~ 0.1 %.

Отмечено, что при температуре жидкого гелия наблюдались устойчивые условия существования разряда: давление в разрядной трубке зависело только от температуры жидкого гелия и тока разряда. В то же время, распыление диэлектрической вставки при комнатной температуре вызывает быстрый рост давления в разрядной трубке и приводит к яркой эмиссии из области вблизи конусного отверстия. Такое повышение давления может быть связано с эффективным распылением диэлектрической вставки. Очевидно, что любой распыленный материал будет сразу же агрегироваться в нанокластеры или осаждаться на холодных поверхностях при температуре жидкого гелия (пары любого вещества, кроме гелия, пересыщены при $T = 2$ К, даже давление молекулярного водорода при такой температуре намного меньше 10^{-5} Па).

Раздел 3.3 содержит выводы к Главе 3.

В **Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы, а именно:

1. При попадании макрочастиц в плазму высокочастотного разряда на поверхность частиц, левитирующих над нижним электродом разрядной камеры, начинают осаждаться металлы, при этом изменение элементного состава поверхности нелинейно во времени. Электроды и элементы газоразрядной

камеры, подвергшиеся эрозии, могут служить источником осажденного материала. Выявлено, что состав и структура поверхности частиц, размещенных на электроде, меняется в ходе экспозиции в плазме. Поверхность частиц подвергается эрозии, в то же время образуются структуры различной формы – игольчатые для частиц без покрытия, столбчатые для частиц с металлическим покрытием.

2. Показано, что при воздействии лазерного излучения динамика движения макрочастиц с модифицированной поверхностью в монослое изменяется и соответствует трем режимам: удержание ловушкой, броуновское движение и комбинированное направлено-случайное движение. Установлено, что полимерные частицы с модифицированной поверхностью являются активными броуновскими частицами и их активность растет с увеличением интенсивности лазерного излучения.

3. Экспериментально зафиксирован рост кинетической энергии модифицированных частиц при лазерном воздействии, в то время как у частиц без модификации кинетическая энергия не изменялась. Показано уменьшение степени упорядоченности монослоя из модифицированных частиц при увеличении интенсивности лазерного излучения. Наблюдался лазерно-индуцированный структурный переход «кристалл-жидкость» в монослое модифицированных макрочастиц, левитирующих в приэлектродном слое емкостного высокочастотного разряда. Предложено объяснение структурного перехода с учетом роли фотофоретической силы в движении макрочастиц. Влияние фотофоретической силы связано с модификацией поверхности макрочастиц в плазме, в результате которой частицы могут эффективно поглощать лазерное излучение.

4. Проведенный анализ структурных и динамических характеристик активных броуновских макрочастиц в цепочечной структуре, сформированной в плазме тлеющего разряда постоянного тока, демонстрирует, что активность макрочастиц растет с увеличением интенсивности лазерного излучения, приводя к структурному переходу с обменом фрагментами цепочек.

5. Впервые исследована мультимодальная пылевая плазма, сформированная в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока при температуре сверхтекучего гелия. Формирование жидкоподобной пылевой структуры произошло после инъекции полидисперсных частиц оксида церия в тлеющий разряд. Облако наночастиц и нелинейные волны внутри облака наблюдались при $T < 2$ К. Впервые наблюдались твердые спиральные волокна, левитирующие в газовом разряде при температуре ~ 2 К и давлении 4 Па. Анализ условий эксперимента и состава волокон позволяет сделать вывод, что волокна и нанокластеры образовались в результате ионного распыления диэлектрического материала в ходе экспериментов.

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертации представлены в следующих работах:

1. Kononov E.A., Vasiliev M.M., Vasilieva E.V., Petrov O.F. «Particle Surface Modification in the Near-Electrode Region of an RF Discharge» // *Nanomaterials*. – 2021. – V. 11. – P. 2931.

2. Koss K.G., Kononov E.A., Lisina I.I., Vasiliev M.M., Petrov O.F. «Dynamic Entropy of Two-Dimensional Active Brownian Systems in Colloidal Plasmas» // *Molecules*. – 2022. – V. 27. – P. 1514.

3. Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Kononov E.A., Trukhachev F.M., «Dynamics of Active Brownian Particles in Plasma» // *Molecules*. – 2021. – V. 26. – P. 561.

4. Vasiliev M.M., Kononov E.A., Arkar K., Petrov O.F., «Dynamics of motion of particles with a modified surface in a dusty plasma monolayer» // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1556. – P. 012074.

5. Кононов Е.А., Васильев М.М., Петров О.Ф., «Лазерно-индуцированный фазовый переход в монослое полимерных частиц, левитирующих в газоразрядной плазме низкого давления» // *Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики*. – 2018. – Т. 153(5), – С. 721-725.

6. Kononov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F., «Localization of active particles in chain structures in a direct current discharge under external influence» // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1556. – P. 012075.

7. Болтнев Р.Е., Васильев М.М., Кононов Е.А., Петров О.Ф., «Явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме: формирование пылевого облака наночастиц и плазменно-пылевых волн» // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2018. – Т. 153(4), – С. 671-676.

8. Boltnev R.E., Vasiliev M.M., Kononov E.A., Petrov O.F., «Formation of solid helical filaments at temperatures of superfluid helium as self-organization phenomena in ultracold dusty plasma» // Scientific Reports. – 2019. – V. 9. – P. 3261.

9. Boltnev R.E., Kononov E.A., Trukhachev F.M., Vasiliev M.M., Petrov O.F., «Synthesis of nanoclusters and quasy one-dimensional structures in glow discharge at $T \approx 2$ K» // Plasma Sources Science and Technology. – 2020. – Vol. 29. – P. 085004.

КОНОНОВ Евгений Александрович

**АКТИВНОЕ БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ
СИЛЬНОВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В
ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ**

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