

Кулоновские пылевые сферы в тлеющем разряде в неоне при криогенной температуре

Д. Н. Поляков, В. В. Шумова, Л. М. Василяк

Определены параметры разряда для заряженных пылевых структур сферической формы (кулоновских пылевых сфер) в плазме неона при температуре стенки разрядного устройства 77 К. Пылевые сферы наблюдались экспериментально при фиксированных давлениях неона 0,15, 0,9 и 1,2 Торр и были получены экстраполяцией при давлениях 0,42 и 0,65 Торр. Пылевые сферы соответствовали точке пересечения зависимостей радиального и аксиального размеров пылевых структур от тока разряда. Проанализирована связь параметров плазмы, при которых образуются пылевые сферы, с составом, фазовым и динамическим состоянием компонент, образующих пылевые сферы, и с размером пылевых сфер. Проведён численный расчёт параметров плазмы разряда и пылевых сфер при изменении давления газа. Обнаружен непрерывный фазовый переход второго рода в пылевых сферах при давлениях 0,15–0,65 Торр. Обнаружено увеличение величины «химического потенциала» пылевой сферы вблизи линии ликвидуса и линии раздела компонентов пылевой смеси на фазовой P–I диаграмме.

Ключевые слова: пылевая плазма, заряженные кулоновские пылевые сферы, криогенные температуры, фазовое состояние, тлеющий разряд.

Введение

Плазма тлеющих разрядов [1], так же как и пылевая плазма [2], в том числе при низких и криогенных температурах [1–4], используется в различных технических устройствах плазменного осаждения и модификации поверхности [5], а также при плазменно-химическом синтезе при криогенных температурах [6].

С момента первого экспериментального получения криогенной пылевой плазмы [7] важным направлением исследований в области пылевой плазмы при низких и криогенных температурах является развитие представлений о процессах её самоорганизации [2, 4, 7–9]. Самоорганизация пылевых частиц в диссипативные пылевые структуры в плазме происходит в результате кулоновского взаимодействия пылевых частиц, удерживаемых в параболических электростатических ловушках в тлеющем или высокочастотном газовом разряде

низкого давления. Количество и концентрация пылевых частиц, а также геометрические параметры пылевой структуры самосогласованным образом определяются параметрами потенциала, задаваемого суперпозицией сил, действующих на пылевые частицы в плазменной ловушке [2, 10, 11], которые определяют равновесие пылевой структуры, форму, размер и координаты её границы. Изменения параметров разряда могут приводить к трансформации пылевых структур различным образом. Пылевые структуры в криогенной плазме различных газов в зависимости от параметров разряда могут отличаться по форме, размерам, составу, степени упорядоченности и динамической стабильности компонент [4, 9, 12–15]. Например, в плазме неона было обнаружено, что в зависимости от тока разряда, давления газа и температуры меняется состав, динамическое состояние компонент, образующих пылевые структуры, а также пространственные формы пылевых структур [9, 13].

Изучение и сравнение пылевых структур столь сложного состава и различных состояний компонент логично проводить для структур, имеющих совпадающие параметры. Такими структурами являются структуры, имеющие идентичную форму, например, пылевые структуры сферической формы (кулоновские пылевые сферы, кулоновские шары [16]), далее по тексту – пылевые сферы. Пылевые сферы образуются в разрядах различного типа при разной температуре и газо-

Поляков Дмитрий Николаевич, с.н.с.

Шумова Валерия Валерьевна, с.н.с., к.ф.-м.н.

Василяк Леонид Михайлович, г.н.с., д.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур

Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Тел. 8(495) 484-18-10. E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 17 июля 2018 г.

© Поляков Д. Н., Шумова В. В., Василяк Л. М., 2018

вом составе [4, 8, 15–20]. Пылевые сферы наблюдались при комнатной температуре в радиочастотном разряде в аргоне [16], разряде постоянного тока в неоне [17] и в воздухе при наложении внешнего магнитного поля [20]. При криогенной температуре разряда пылевые сферы наблюдались в тлеющем разряде постоянного тока в гелии при температуре 1,69 К [15]. В работе [8] пылевые сферы были получены путём изменения давления гелия и тока разряда при температуре 77 К, а в работе [18] переход пылевой структуры к сферической форме наблюдался при снижении температуры плазмы гелия от 175 до 135 К. Однако условия образования пылевых сфер пока не выяснены.

Поскольку пылевая плазма является открытой диссипативной структурой, ее только условно можно описать в приближении термодинамической системы, поэтому далее термодинамические понятия приведены в кавычках. Пылевые сферы из заряженных частиц образуются не только в лабораторной плазме, но также вне плазмы и могут существовать в атмосферных облаках и туманах [21].

В данной работе исследовалось влияние тока разряда на размеры, форму, состав и фазовое состояние сложных пылевых структур, состоящих из пылевых кластеров и пылевых частиц, образующихся в тлеющем разряде постоянного тока в неоне при температуре стенки разрядного устройства 77 К.

Описание эксперимента и численной модели

Пылевые структуры были образованы сферическими пластиковыми частицами диаметром 4,14 мкм, введёнными в разряд постоянного тока в неоне при абсолютных давлениях 0,15, 0,42, 0,9 и 1,2 Торр. Ток разряда менялся в диапазоне $I = 0,1\text{--}3,2$ мА при температуре стенки разрядного устройства равной 77 К. Разрядным устройством служила стеклянная трубка с внутренним диаметром 1,65 см и длиной 20 см с полым катодом и анодом. Охлаждение разрядной трубки проводилось в оптическом криостате, где поддерживалась неизменной температура стенки разрядного устройства. Для определения напряжённости продольного электрического поля E_l и удержания пылевых частиц в разрядной трубке вблизи катода были расположены два узких кольцевых электрода, разнесённых на расстояние 4 см друг от друга, между которыми измерялось падение напряжения в положительном столбе разряда и рассчитывалась средняя величина напряжённости продольного электрического поля разряда. Измерения напряжённости E_l и тока сопоставлялись с измерениями

формы и геометрических размеров пылевой структуры, которые проводились по изображениям пылевых частиц. Изображения пылевых частиц регистрировались в отраженном свете плоского лазерного луча с помощью микроскопа и видеокамеры в продольном сечении разряда. По изображениям в аксиальном сечении определялась концентрация пылевых частиц в структуре n_d , при этом пылевые структуры анализировались по внутреннему составу, форме, степени упорядоченности и динамической стабильности компонент. Длина пылевой структуры измерялась на оси разряда, а её диаметр измерялся на половине её длины. Схема экспериментальной установки и её подробное описание приведено в работах [1, 13].

Численные расчёты параметров плазмы разряда с пылевыми частицами проведены на основе диффузионно-дрейфовой модели однородного положительного столба тлеющего разряда в неоне с пылевыми частицами [22–24]. Модель учитывает тепловыделение разряда и диссипацию энергии плазмы на стенках разрядной трубки и микрочастицах, в том числе за счет тушения возбуждения метастабильных атомов неона. В модели использованы значения средней энергии электронов, транспортные коэффициенты, константы скоростей реакций возбуждения и ионизации с участием электронов, полученные с помощью пакета BOLSIG+ и SIGLO Database. В расчёте использовалось распределение пылевых частиц по радиусу с осесимметричным плоским профилем $n_d(r) = n_{d,0}$ при $r \leq r_d$ и экспоненциальным спадом по краям $n_d(r) = n_{d,0} \exp(-(r - r_d)/0,1R)$ при $r > r_d$. Расчёты выполнялись для измеренных в эксперименте значений параметров разряда и пылевых структур. Используя этот подход, рассчитывались радиальные распределения компонент плазмы и радиальная напряжённость электрического поля $E_r(r)$. Заряд пылевых частиц в плазме определялся в приближении слабостолкновительной плазмы [25]. Радиальный профиль температуры газа $T(r)$ в разрядной трубке рассчитан путем решения стационарного одномерного уравнения теплопроводности [26].

Результаты и обсуждение

Обнаружено, что при изменении тока разряда меняются форма и размеры пылевой структуры при всех давлениях газа. В исследуемом диапазоне давлений радиальный размер пылевой структуры (диаметр) D с ростом тока увеличивается, а аксиальный размер (длина) L уменьшается (см. рис. 1).

Для упрощения восприятия экспериментальные точки на рис. 1 приведены для одного значения давления, чтобы показать количество измерений для разных токов разряда. Для остальных

ных давлений приведены аппроксимации экспериментальных данных линиями 1–8 без экспериментальных точек.

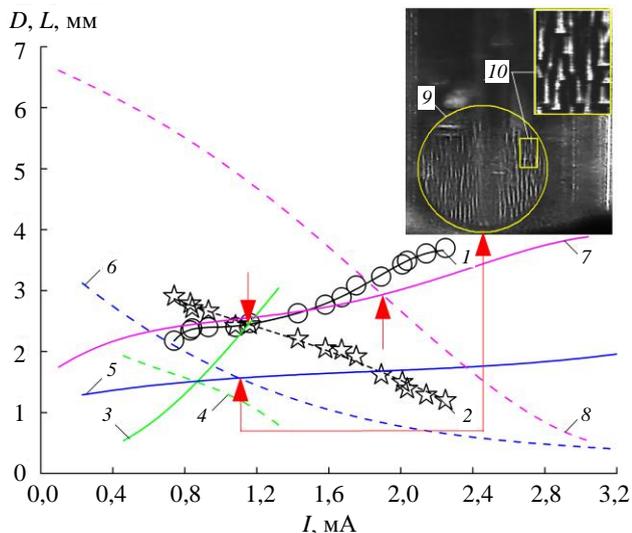


Рис. 1. Зависимость диаметра D (круги и сплошные линии 1, 3, 5, 7) и длины L (звезды и пунктирные линии 2, 4, 6, 8) пылевой структуры от тока разряда I , при разных давлениях P : 0,15 Торр (1, 2), 0,42 Торр (3, 4), 0,9 Торр (5, 6), 1,2 Торр (7, 8). Показаны: экспериментальные данные – знаки, аппроксимация экспериментальных данных – линии, изображение пылевой сферы (9) (обведено) и увеличенный фрагмент изображения (10). Стрелками показаны соответствующие графику пылевые сферы, наблюдавшиеся экспериментально.

Аналогичное поведение размеров пылевой структуры от тока наблюдалось в разрядах в различных газах при комнатной температуре [9, 10, 27, 28].

Обнаружено, что при изменении тока разряда наблюдается переход контура пылевой структуры через сферическую форму различного диаметра 9 (рис. 1). Точки пересечения полученных зависимостей $D(I)$ и $L(I)$ дают весьма точные параметры пылевых сфер, наблюдавшихся экспериментально при давлениях 0,15, 0,9 и 1,2 Торр (показаны стрелками). При давлении 0,42 Торр точка на пересечении линий соответствует предполагаемой пылевой сфере из-за отсутствия прямой экспериментальной точки.

Различным давлениям газа соответствовал разный состав пылевых сфер и динамическое состояние пылевой компоненты. Как было обнаружено ранее, в отличие от комнатных температур, где пылевые структуры образованы, как правило, отдельными пылевыми частицами, при криогенных температурах пылевые частицы образуют кластеры, которые служат элементами построения пылевых «кристаллов», а при их «плавлении» в «жидкой» фазе образуются смеси кластеров и пы-

левых частиц [4, 9, 13, 19]. При давлениях 0,9 и 1,2 Торр пылевые сферы состоят из одномерных линейных (нитевидных) кластеров (далее по тексту – простых кластеров) (фрагмент 10, рис. 1), находящихся в «жидкой» фазе. Расстояние между простыми кластерами было 40–100 мкм и зависело от температуры и давления газа [9, 13]. При увеличении давления плотность кластеров росла. Простой кластер состоял из 2–10 отдельных пылевых частиц и был ориентирован по направлению продольного электрического поля разряда [9, 13, 19]. Расстояние между ближайшими пылевыми частицами в простом кластере было 10–50 мкм и также, как и расстояние между простыми кластерами, уменьшалось с понижением температуры газа [9, 13].

При более низких давлениях 0,15 и 0,42 Торр и токе $I > 0,63$ мА пылевые сферы состоят из смеси простых кластеров и сложных (многомерных) кластеров, находящихся в «жидкой» фазе, и отдельных пылевых частиц, находящихся в движении [13, 19]. Сложные кластеры представляют собой плоскую структуру, состоящую из двух рядов, образованных из 3–6 простых кластеров. При $P \leq 0,15$ Торр и $I \leq 0,63$ мА сложные кластеры образуют «квази-кристаллические» структуры [19]. Доля отдельных пылевых частиц и сложных кластеров при росте давления резко уменьшается, и при давлении 0,42 Торр пылевые структуры, регистрируемые экспериментально при меньшем и большем токе, чем ток, соответствующий предполагаемой пылевой сфере, состоят только из сложных и простых кластеров. При дальнейшем росте давления сложные кластеры распадаются на простые кластеры, что сопровождается резким увеличением средней концентрации пылевых частиц. При смене давления газа частицы досыпали в разряд до максимального количества, удерживаемого в плазменной ловушке.

На рис. 2 значения, соответствующие пылевой сфере 4–8, приведены на фазовой диаграмме $P-I$ (давление–ток). Области разных фазовых состояний и состава по давлению 1–3 условно разграничены пунктирными линиями, где 1 – область «квази-кристаллического» состояния для сложных кластеров, 2 – область, в основном соответствующая смеси простых и сложных кластеров, находящихся в «жидком» состоянии, и 3 – область простых кластеров, находящихся в «жидком» состоянии. Линия между областью 1 и 2 – это линия перехода к смеси сложных и простых кластеров и, по существу, линия «солидуса», показывающая границу окончания «кристаллизации» или начала «плавления» «квази-кристаллической» структуры, образованной сложными кластерами.

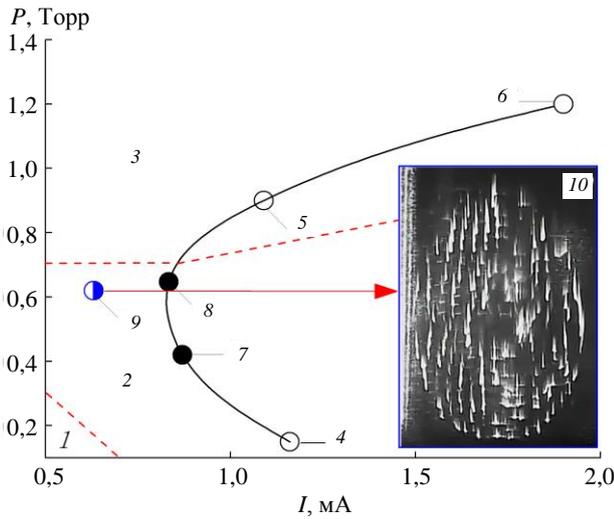


Рис. 2. Фазовая P–I диаграмма для пылевых структур. Области 1–3 различных фаз и смеси компонентов, разделены пунктирной линией: 1 – «квази-кристаллическое» состояние, 2 – смесь сложных и простых кластеров в «жидком» состоянии, 3 – простые кластеры в «жидком» состоянии. Не зашитые знаки 4–6 – пылевые сферы, наблюдавшиеся экспериментально. Зашитые знаки 7, 8 – пылевые сферы полученные аппроксимацией экспериментальных данных, Полу-зашитый знак 9 – пылевая структура 10 с параметрами наиболее близкими к расчётной пылевой сфере 8. Стрелкой показано соответствующее графику изображение пылевой структуры.

Линия между областью 2 и 3 – это линия перехода от смеси сложных и простых кластеров к однокомпонентному составу из простых кластеров и, по существу, линия «ликвидуса», показывающая границу окончания «плавления» или начальной «кристаллизации» сложных кластеров. В точках 4–6 сферическая структура наблюдалась экспериментально. Точка 7, как упоминалось выше, получена из пересечения аппроксимаций экспериментальных данных по продольному и радиальному размеру пылевой структуры (предполагаемая пылевая сфера при давлении 0,42 Торр). Точка 8 получена путём совместных аппроксимаций зависи-

мостей радиуса пылевой сферы от давления $R(P)$ и тока разряда, соответствующего данной пылевой сфере от давления $I(P)$ кубической функцией. Полученный усредненный по давлению минимум зависимостей $R(P)$ и $I(P)$ дал дополнительную точку 8 для пылевой сферы при давлении около 0,65 Торр. По давлению точка 8 наиболее близко соответствует экспериментально наблюдаемой пылевой структуре 9, 10. В расчётах для точки 8 максимальная средняя концентрация пылевых частиц бралась как для точки 9 (ближайшей по давлению), но меньшей по току (рис. 2). Поскольку при увеличении тока концентрация частиц падает [19], то минимальная концентрация для точки 8 бралась примерно равной по величине тока точке 7 при меньшем давлении газа (рис. 2). В точке 8 концентрация сложных кластеров в смеси минимальна (что видно из изображения 10 для ближайшей по давлению точки 9) и предполагается, что она находится вблизи линии «ликвидуса».

По предложенной выше модели для описания термодинамического состояния пылевой системы проведён расчёт средней по радиусу пылевой структуры температуры газа T в разряде с пылевыми частицами и без частиц T_0 . Температура рассчитывалась в предположении термодинамического равновесия температуры пылевой компоненты в пылевой сфере $T_{sph} = T$ и температуры газа. При увеличении давления наблюдается рост температуры T_{sph} . Для оценки силы связи между пылевыми частицами проведён расчёт заряда пылевой сферы Q_{sph} . Расчёт показал, что заряд пылевой сферы минимален при давлении 0,65 Торр при минимуме тока разряда и минимуме размера пылевой сферы. Полученные параметры пылевой сферы сведены в таблице.

Расположение пылевых сфер на фазовой диаграмме было принято за основу разбиения пылевых сфер по группам (таблица) для анализа и классификации их свойств.

Таблица

Параметры пылевых сфер

P , Торр	I , мА	R , мм	n_d , 10^6 см^{-3}	Q_{sph} , 10^{-12} Кл	T_{sph} , К	Состав пылевой смеси	Фазовое состояние основных компонент
Группа 1							
0,15	1, 16	1, 22	0,4	1,36	80,8	сложные и простые кластеры и отдельные пылевые частицы	«жидкость»
0,42	0,87	0,875	0,8	0,48	81,7	сложные и простые кластеры	
0,65	0,833	0,7	0,8–1,6	0,23–0,35	81,8	сложные и простые кластеры	
Группа 2							
0,9	1,09	0,78	7,7	1,37	83,4	простые кластеры	«жидкость»
1,2	1,9	1,47	12	12,06	92	простые кластеры	

Особенности самоорганизации пылевых кулоновских сфер заключались в разном составе, разном динамическом состоянии компонент и различной средней концентрации пылевых частиц в пылевой сфере. Условно пылевые сферы можно разбить на две группы (см. таблицу), различающиеся по составу. В пределах каждой группы вид зависимости размера пылевой сферы от тока одинаков (выше ток – больше радиус сферы), а увеличение давления приводит к увеличению доли (концентрации) простых кластеров. Соответственно наблюдается «плавление» сложных кластеров в направлении увеличения давления в области 2 (рис. 2), что можно определить как непрерывный мезоморфный фазовый переход второго рода [19].

Так как параметры пылевых сфер различны, то для описания их свойств были рассчитаны удельные и приведённые характеристики $Q_d = Q_{sph}/N$ и $\mu_{sph} = \Delta T_{sph}/N$, где N – число пылевых частиц в пылевой сфере, а $\Delta T_{sph} = T_{sph} - T_0$ прирост температуры плазменно-пылевой системы, связанный с присутствием пылевых частиц в плазме. Удельный прирост температуры μ_{sph} является для пылевой системы аналогом химического потенциала (далее по тексту «химический потенциал» пылевой сферы).

На рис. 3 видно, что зависимость средней величины заряда пылевой частицы от давления $Q_d(P)$ немонотонна в окрестности давления 0,65 Торр. Полученная немонотонность указывает на окончание фазового перехода вблизи данной точки и может быть интерпретирована следующим образом. Заряд пылевой частицы определяется эффективной поверхностью зарядки, которая при увеличении давления растёт. Это происходит из-за увеличения доли простых кластеров, для которых поверхность зарядки выше, чем у сложных кластеров из-за большей степени кулоновского экранирования последних. Далее, после фазового перехода, происходит уменьшение заряда простых кластеров, которое связано с увеличением концентрации, кластеров, также ограничивающих их зарядку. Вблизи линии «ликвидуса» и линии раздела компонентов пылевой смеси при давлении 0,65 Торр впервые обнаружен максимум величины «химического потенциала» пылевой сферы μ_{sph} (см. рис. 3). Увеличение величины «химического потенциала» пылевой сферы сопровождается переходом от многокомпонентной многофазной смеси к однофазному гомогенному составу.

Из рис. 3 видно, что заряд пылевой частицы и «химический потенциал» пылевой сферы растут с уменьшением концентрации пылевых частиц. Расчётное распределение потенциальной энергии пылевой частицы от давления имеет минимум при давлении 0,5 Торр, что указывает на максималь-

ную вероятность фазового перехода для сложных кластеров в этой точке. Таким образом, в области 2 (см. рис. 2) для пылевых сфер при росте давления происходит непрерывный мезоморфный фазовый переход второго рода для сложных кластеров, находящихся в смеси с простыми кластерами.

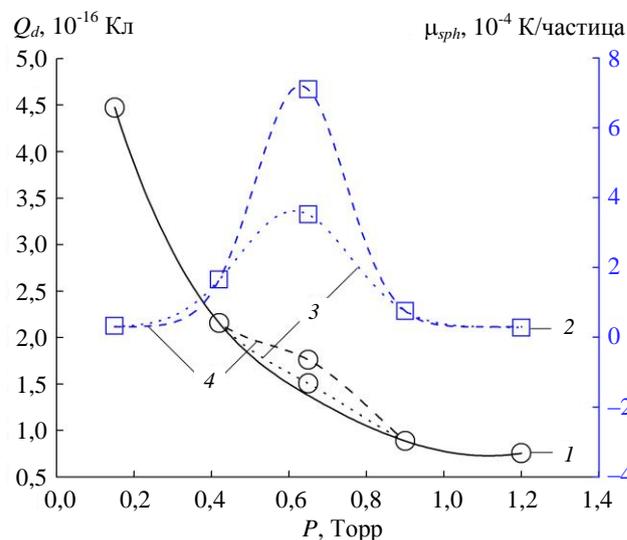


Рис. 3. Зависимости среднего заряда пылевой частицы Q_d (кривая 1, круги) и «химического потенциала» пылевой сферы μ_{sph} (кривая 2, квадраты) от давления P при разной концентрации пылевых частиц n_d : $16 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (кривая 3), $8 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ (кривая 4).

Заключение

В работе получены параметры плазмы и разряда в неоне, приводящие к самоорганизации пылевых кулоновских сфер. Обнаружен непрерывный фазовый переход второго рода в пылевых кулоновских сферах при давлении 0,15–0,65 Торр при криогенных температурах. Обнаружено, что увеличение доли простых кластеров в смеси со сложными кластерами приводит к увеличению заряда пылевых частиц. Обнаружено, что увеличение концентрации пылевой компоненты ограничивает её зарядку и её нагрев. Показано, что максимум величины «химического потенциала» пылевой сферы находится вблизи линии «ликвидуса» и сопровождается переходом от многокомпонентной многофазной смеси к однофазному гомогенному составу.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-02-00991).

ЛИТЕРАТУРА

1. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. Vol. 50. No. 40. 405202.

2. Fortov V. E., Morfill G. E. Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. – Boca Raton: CRC Press, 2009.
3. Stauss S., Muneoka H., Terashima K. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. 023003.
4. Polyakov D. N., Vasilyak L. M., Shumova V. V. // Surf. Eng. Appl. Electrochem. 2015. Vol. 51. P. 143.
5. Oehrlein G. S., Hamaguchi S. // Plasma Sources Sci. Technol. 2018. Vol. 27. 023001.
6. Huttel Y. Gas-phase synthesis of nano-particles. – Weinheim: Wiley VCH, 2017.
7. Fortov V. E., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Zimmukhov V. S., Nefedov A. P., Polyakov D. N. // Dokl. Phys. 2002. Vol. 47. P. 21.
8. Petrov O. F., Fortov V. E. // Contrib. Plasma Phys. 2013. Vol. 53. P. 767.
9. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. 08LT01.
10. Balabanov V. V., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Nefedov A. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2001. Vol. 92. No. 1. P. 86.
11. Шумова В. В., Поляков Д. Н., Васильяк Л. М. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 36.
12. Shindo M., Samarian A., Ishihara O. // JPS Conf. Proc. 2014. Vol. 1. 015049. <https://doi.org/10.7566/JPSCP.1.015049>
13. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 774. P. 012181.
14. Samoilo I. S., Baev V. P., Timofeev A. V., Amirov R. Kh., Kirillin A. V., Nikolaev V. S., Bedran Z. V. // J. Exp. Theor. Phys. 2017. Vol. 124 P. 496.
15. Boltnev R. E., Vasiliev M. M., Kononov E. A., Petrov O. F. // J. Exp. Theor. Phys. 2018. Vol. 126. No. 4. P. 561.
16. Arp O., Block D., Klindworth M., Piel A. // Phys. Plasmas. 2005. Vol. 12. 122102.
17. Fortov V. E., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F. // Phys. Plasmas. 1999. Vol. 6. P. 1759.
18. Antipov S. N., Vasiliev M. M., Alyapyshev M. M., Petrov O. F., Fortov V. E. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 511. 012008.
19. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Vestnik DGU (Herald of Dagestan State University) Series 1. Natural Sciences. 2018. No. 1. P. 22. (in Rus.) <http://vestnik.dgu.ru/Stat/v2018-est-1-3.pdf>
20. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // Vestnik DGU (Herald of Dagestan State University). Series 1. Natural Sciences. 2007. No. 4. P. 24 (in Rus.) <http://vestnik.dgu.ru/Stat/2007.4.4.pdf>
21. Shavlov A. V., Dzhumandzhi V. A., Romanyuk S. N. // Phys. Let. A. 2011. Vol. 376. P. 39.
22. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 065008.
23. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. Vol. 653. P. 012132.
24. Shumova V. V., Polyakov D. N., Vasilyak L. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. No. 3. P. 035011.
25. D'yachkov L. G., Khrapak A. G., Khrapak S. A., Morfill G. E. // Phys. Plasmas. 2007. Vol. 14. 042102.
26. Polyakov D. N., Shumova V. V., Vasilyak L. M. // Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. 2014. V. 9. No. 3. P. 1249.
27. Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Polyakov D. N., Fortov V. E. // J. Exp. Theor. Phys. 2005. Vol. 100. No. 5. P. 1029.
28. Fedoseev A. V., Sukhinin G. I., Abdirakhmanov A. R., Dosbolayev M. K., Ramazanov T. S. // Contrib. Plasma Phys. 2016. Vol. 56. P. 234.

PACS: 52.27.Lw; 52.50.Nr.

Coulomb dust spheres in glow discharge in neon at cryogenic temperature

D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: cryolab@ihed.ras.ru

Received July 17, 2018

The plasma parameters leading to the formation of spherical dust structures (coulomb dust spheres) in neon plasma have been experimentally determined at the discharge device wall temperature of 77 K. The dust spheres were observed experimentally at pressures of 0.15, 0.9 and 1.2 Torr and were obtained by interpolation at pressures of 0.42 and 0.65 Torr. The dust spheres corresponded to the intersection of the dependencies of radial and axial sizes of dust structures upon the discharge current. The relationship has been analyzed between the plasma parameters and the composition, phase and dynamic state of the components forming dust spheres, and the dust spheres sizes. Numerical simulation of the plasma parameters and parameters dust spheres with the change of gas pressure has been carried out. A continuous second-order phase transition has been found in dust spheres in a pressure range 0.15–0.65 Torr. An increase of the magnitude of the "chemical potential" of the dust sphere near the liquidus line and the line of separation of the components of the dust mixture on the phase P–I diagram has been found.

Keywords: dusty plasma, coulomb dust spheres, cryogenic temperatures, phase state, glow discharge.

REFERENCES

1. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 405202 (2017).
2. V. E. Fortov and G. E. Morfill, *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space* (Boca Raton, CRC Press, 2009).
3. S. Stauss, H. Muneoka, and K. Terashima, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 023003 (2018).
4. D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, and V. V. Shumova, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* **51**, 143 (2015).
5. G. S. Oehrlein and S. Hamaguchi, *Plasma Sources Sci. Technol.* **27**, 023001 (2018).
6. Y. Huttel, *Gas-Phase Synthesis of Nano-Particles* (Weinheim, Wiley VCH, 2017).
7. V. E. Fortov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. S. Zimnukhov, A. P. Nefedov, and D. N. Polyakov, *Dokl. Phys.* **47**, 21 (2002).
8. O. F. Petrov and V. E. Fortov, *Contrib. Plasma Phys.* **53**, 767 (2013).
9. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 08LT01 (2017).
10. V. V. Balabanov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, A. P. Nefedov, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **92**, 86 (2001).
11. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, L. M. Vasilyak, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 36 (2018).
12. M. Shindo, A. Samarian, and O. Ishihara, *JPS Conf. Proc.* **1**, 015049 (2014). <https://doi.org/10.7566/JSPSC.1.015049>
13. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *J. Phys.: Conf. Ser.* **774**, 012181 (2016).
14. I. S. Samoilo, V. P. Baev, A. V. Timofeev, R. Kh. Amirov, A. V. Kirillin, V. S. Nikolaev, and Z. V. Bedran, *J. Exp. Theor. Phys.* **124**, 496 (2017).
15. R. E. Boltnev, M. M. Vasiliev, E. A. Kononov, and O. F. Petrov, *J. Exp. Theor. Phys.* **126**, 561 (2018).
16. O. Arp, D. Block, M. Klindworth, and A. Piel, *Phys. Plasmas*. **12**, 122102 (2005).
17. V. E. Fortov, V. I. Molotkov, A. P. Nefedov, and O. F. Petrov, *Phys. Plasmas*. **6**, 1759 (1999).
18. S. N. Antipov, M. M. Vasiliev, M. M. Alyapyshev, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **511**, 012008 (2014).
19. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Vestnik DGU (Herald of Daghestan State University) Series 1. Natural Sciences*. **1**, 22 (2018) (in Rus.) <http://vestnik.dgu.ru/Stat/v2018-est-1-3.pdf>
20. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *Vestnik DGU (Herald of Daghestan State University). Series 1. Natural Sciences*. **4**, 24 (2007) (in Rus). <http://vestnik.dgu.ru/Stat/2007.4.4.pdf>
21. A. V. Shavlov, V. A. Dzhumandzhi, and S. N. Romanyuk, *Phys. Let. A.* **376**, 39 (2011).
22. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 065008 (2014).
23. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *J. Phys.: Conf. Ser.* **653**, 012132 (2015).
24. V. V. Shumova, D. N. Polyakov, and L. M. Vasilyak, *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 035011 (2017).
25. L. G. D'yachkov, A. G. Khrapak, S. A. Khrapak, and G. E. Morfill, *Phys. Plasmas*. **14**, 042102 (2007).
26. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* **9**, 1249 (2014).
27. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **100**, 1029 (2005).
28. A. V. Fedoseev, G. I. Sukhinin, A. R. Abdirakhmanov, M. K. Dosbolayev, and T. S. Ramazanov, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 234 (2016).
26. D. N. Polyakov, V. V. Shumova, and L. M. Vasilyak, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures* **9** (3), 1249 (2014).
27. L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, D. N. Polyakov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.* **100** (5), 1029 (2005).
28. A. V. Fedoseev, G. I. Sukhinin, A. R. Abdirakhmanov, M. K. Dosbolayev, and T. S. Ramazanov, *Contrib. Plasma Phys.* **56**, 234 (2016).