УДК 537.525

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-22-27

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

Фазовые переходы в пылевых структурах в тлеющем разряде в неоне при криогенной температуре

Объединённый институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; cryolab@ihed.ras.ru

При уменьшении температуры обнаружена «конденсация» пылевых частиц с образованием кластеров. Экспериментально исследована трансформация сложных пылевых структур при изменении тока тлеющего разряда постоянного тока в неоне при давлении 20 Па и температуре 77 К. Исследовано влияние тока разряда на форму и состав пылевых структур, состоящих из пылевых кластеров, образующихся при криогенной температуре в неоне. В зависимости от величины тока разряда обнаружены признаки фазовых переходов первого и второго рода в пылевых структурах и мезоморфные состояния пылевой плазмы.

Ключевые слова: *пылевая плазма, структуры заряженных пылевых частиц, пылевые кластеры, фазовый переход, тлеющий разряд, неон, криогенные температуры.*

Введение

Заряженные пылевые облака в плазме могут находиться в состояниях, аналогичных термодинамическим состояниям вещества [1], в которых наблюдаются фазовые переходы. Пылевая плазма может быть определена в приближении термодинамической системы через параметр неидеальности (кинетическую температуру частиц), и ее свойства могут быть представлены в гидродинамическом приближении через транспортные характеристики сплошной среды [2]. Пылевая плазма – это неравновесная, диссипативная, открытая, неидеальная система с сильным кулоновским взаимодействием. Изучая пылевые структуры, можно моделировать условия в неидеальных системах в микромире, в том числе при низких и криогенных температурах газа.

Интерес к исследованию характеристик газоразрядной плазмы с пылевыми частицами, охлажденной до криогенных температур, диктуется возможностью применения такой плазмы при создании нового класса плазмохимических технологий [3]. Эти исследования актуальны для развития теории нуклеации, процессов роста и агломерации наноструктур и коагуляции микро- и наночастиц в плазме, а также [4–6] будут способствовать их развитию в области смежных наук [7, 8]. При низких и криогенных температурах газа в плазме могут образоваться структуры, состоящие из пылевых кластеров [6, 9–12], и происходит Бозе-конденсация [13]. Эти кластеры, как и отдельные пылевые частицы, могут формировать узлы кристаллической решётки подобно атомам в твердом теле, а также формировать структуры в жидком и газообразном состоянии.

Известно, что наибольшее влияние на топологические параметры пылевой структуры оказывает ток разряда. Влияние тока, например, на радиальные размеры пылевой структуры наблюдается в плазме разных газов с различными параметрами пылевых частиц [14–16].

Эксперимент

В данной работе исследовано влияние тока разряда на размеры пылевых структур, форму, состав и фазовое состояние сложных пылевых структур, состоящих из пылевых кластеров при криогенной температуре газа. Исследовались параметры пылевых структур (2) (рис. 1), образованных сферическими пластиковыми частицами диаметром 4,14 мкм, введенными в разряд постоянного тока в неоне при давлении 20 Па (измеренном при температуре 295 К) при изменении тока разряда I от 0,1 до 3,2 мА. Разряд зажигался в стеклянной разрядной трубке (1) с внутренним диаметром 1,65 см и длиной 20 см (рис. 1). Для измерения напряжённости продольного электрического поля E и удержания пылевых частиц в разрядной трубке вблизи катода были расположены два узких кольцевых электрода (3), разнесённых на расстояние $l = 4$ см друг от друга. На кольцевых электродах измерялось падение напряжения в положительном столбе разряда (13). Разрядная трубка помещалась в оптический криостат (5), где охлаждалась до температуры кипения жидкого азота $T = 77$ К. При различных токах разряда были проведены измерения полного напряжения на разряде U , падения напряжения в положительном столбе разряда и геометрических параметров пылевой структуры. На основе электрических измерений рассчитывались напряжённость продольного электрического поля разряда и значения погонной мощности Q , вкладываемой в разряд. Температура газа в разряде принималась равной температуре стенки разрядной трубки около исследуемого участка разряда с пылевыми частицами. По изображениям (6) в аксиальном сечении пылевые структуры анализировались по внутреннему составу, форме, степени упорядоченности и динамической стабильности компонент. Схема экспериментальной установки и её подробное описание приведены также в работах [10, 11, 17].

Результаты эксперимента

При комнатной температуре газа (около 295 К) пылевые структуры в тлеющем разряде неона образуются из отдельных пылевых частиц (рис. 2а). При уменьшении температуры газа отдельные пылевые частицы в тлеющем разряде в неоне образуют кластеры (рис. 2б). При криогенной температуре газа кластеры приобретают аксиальный ориентационный порядок (рис. 2с). При образовании кластеров присутствуют признаки фазового перехода первого рода, при котором плотность частиц резко возрастает и продолжает увеличиваться с уменьшением температуры газа. Процесс образования кластеров можно рассматривать как «конденсацию» и «осаждение» пылевых частиц [12]. Пылевые структуры при температуре $T = 77$ К в тлеющем разряде в неоне могут быть многокомпонентными [11, 12]. Многокомпонентные системы представляют смесь пылевых частиц и кластеров, образованных пылевыми частицами. Состав пылевой системы зависит от давления газа и тока разряда. Однокомпонентные пылевые системы состоят из простых кластеров (рис. 2с). Нитевидные кластеры состоят из отдельных пылевых частиц и ориентированы по направлению продольного электрического поля разряда. Нитевидные кластеры образуют однородные пылевые структуры, находящиеся в «жидком» состоянии. Такие структуры наблюдаются при давлениях неона $P \geq 120$ Па.

При понижении давления газа образуются сложные многомерные системы состоящие из нитевидных кластеров. В этой области наблюдается мезоморфное состояние пылевой системы, где образуется смесь простых и сложных кластеров, находящаяся в «жидком» состоянии. Дальнейшее понижение давления приводит к «кристаллизации» кластеров. При давлении около 20 Па при небольших токах разряда менее 1 мА, соответствующих области поднормального разряда, образуются сложные упорядоченные кластеры, формирующие квази-кристаллическую решетку (рис. 3б). Ранее было пока-

зано, что разрушение упорядоченных структур, состоящих из сложных кластеров, до жидкого состояния структуры с ниточными кластерами при изменении давления происходит при уменьшении приведённой напряжённости продольного электрического поля разряда [9–11]. Упорядоченная структура (рис. 3б) образована кластерными цепочками, звенья которых состоят из сложных кластеров. Связь между звеньями в цепочках сильнее, чем связь между цепочками в структуре. На этот факт указывают изгиб цепочки и упругое возвращение её продольной ориентации в случае поворота структуры вдоль оси разряда.

На рисунке 3а показаны зависимости объема пылевой структуры V и погонной мощности Q , вкладываемой в разряд, от тока разряда I . Можно выделить три характерных области с различным составом и фазовым состоянием пылевых структур. Область I соответствует «твёрдому» состоянию пылевой системы, в пылевой структуре сложные упорядоченные кластеры формируют квазикристаллическую решетку. При увеличении тока разряда между 0,631 и 0,633 мА наблюдается непрерывный структурный переход с признаками фазового перехода второго рода, который сопровождается понижением и исчезновением симметрии пылевой структуры. Наблюдается «плавление» (рис. 3б) упорядоченной структуры, образованной сложными многомерными кластерами. В области II пылевая система находится в мезоморфном состоянии, образуется смесь из простых и сложных кластеров и отдельных пылевых частиц. Это состояние, где могут происходить реконструктивные переходы аллотропных конструкций от кристалла до сплава кристалла в изотропной жидкости и обратно при изменении тока разряда. При большем токе разряда $I = 0,691$ мА обнаружен фазовый переход с признаками фазового перехода первого рода: наблюдалось резкое изменение (скачок) объема пылевой структуры, т. е. плотность пылевого облака резко уменьшилась (рис. 3а). Дальнейшее увеличение тока (область III) приводило к изменению формы пылевой структуры при примерно постоянном её объеме, изменению относительной концентрации компонент и изменению их динамического состояния. Пылевая система в области III состоит из смеси отдельных пылевых частиц и простых кластеров. Отдельные пылевые частицы находятся в состоянии, напоминающем «кипящую жидкость» или «газ», а простые кластеры находятся в «жидком» состоянии (рис. 3д, е). При дальнейшем увеличении тока разряда концентрация отдельных пылевых частиц и степень их неустойчивости уменьшаются.

Заключение

Показано влияние температуры разряда на состав заряженной пылевой компоненты. При уменьшении температуры обнаружена «конденсация» заряженных пылевых частиц в простые кластеры. Исследовано влияние тока разряда на форму и состав сложных кулоновских пылевых структур, состоящих из пылевых кластеров при криогенной температуре газа. Обнаружены фазовые переходы первого и второго рода. При увеличении тока сложные кластеры плавятся, и в зависимости от величины тока образуется смесь компонент, состоящая из простых и сложных кластеров и отдельных пылевых частиц.

Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – разрядная трубка, 2 – пылевое облако, 3 – кольцевые электроды, 4 – катод, 5 – криостат, 6 – изображение пылевого облака, 7 – микроскоп, 8 – плоский лазерный луч, 9 – лазер, 10 – видеореги́стратор, 11 – видеокамера, 12 – анод, 13 – измеритель напряжения, 14 – измеритель тока, 15 – высоковольтный источник питания

Рис. 2. Фрагменты пылевых структур при уменьшении температуры газа

Рис. 3. Изменение (а) объёма пылевой структуры V (круги) и погонной мощности вкладываемой в разряд Q (треугольники) от тока разряда I и (б–е) изображения пылевых структур при разных токах соответствуют характерным точкам инверсии фазовых переходов

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант № 16-02-00991).

Литература

1. Morfill G.E. and Ivlev A.V. Complex plasmas: An interdisciplinary research field // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – P. 1353–1403.
2. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. Positive Column of Glow Discharge with Dust Particles // Surf. Eng. Appl. Elect. – 2013. – V. 49, № 2. – P. 114–124.
3. Stauss S., Muneoka H. and Terashima K. Review of plasmas in extraordinary media: Plasmas in cryogenic conditions and plasmas in supercritical fluids // Plasma Sources Sci. Technol. – 2018. – V. 27. – 023003.
4. Huttel Y. Gas-Phase Synthesis of Nano-Particles. – Weinheim: Wiley VCH, 2017.
5. Asinovskii E.I., Kirillin A.V. and Markovets V.V. Plasma coagulation of microparticles on cooling of glow discharge by liquid helium // Phys. Let. A. – 2006. – V. 350. – P. 126–128.
6. Polyakov D.N., Vasilyak L.M., Shumova V.V. Synergetics of Dusty Plasma and Technological Aspects of the Application of Cryogenic Dusty Plasma // Surf. Eng. Appl. Elect. – 2015. – V. 51, № 2. – P. 143–151.
7. Goldanskii V.I. Chemical reactions at very low temperatures // Ann. Rev. Phys. Chern. – 1976. – V. 27. – P. 85–126.
8. Krems R.V. Cold controlled chemistry // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2008. – V. 10. – P. 4079–4092.
9. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. Electric field on the diagram of phase transitions in cryogenic dusty plasmas // Rom. Rep. Phys. – 2015. – V. 67. – P. 1040–1048.

10. Polyakov D.N., Shumova V.V. and Vasilyak L.M. Formation of structures from dusty clusters in cryogenic plasma of glow discharge // IEEE ICOPS/BEAMS Proc. – 2014. – P. 670–674.
11. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. Formation of structures from dusty clusters in dc discharge at plasma cooling // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – V. 774. – 012181.
12. Polyakov D.N., Shumova V.V., Vasilyak L.M. Transformations of dust structures in glow DC discharge in neon: effect of gas temperature and discharge current // Plasma Sources Sci. Technol. – 2017. – V. 26. – 08LT01.
13. Barmashova T.V., Mart'yanov K.A., Makhalov V.B. and Turlapov A.V. Fermi liquid-to-Bose condensate crossover in a two-dimensional ultracold gas experiment // Physics-Uspekhi. – 2016. – V. 59. – P. 174–183.
14. Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Polyakov D.N. and Fortov V.E. Formation of Complex Structures in Dusty Plasmas under Temperature Gradients // J. Exp. Theor. Phys. – 2005. – V. 100. – P. 1029–1034.
15. Шумова В.В., Поляков Д.Н., Василяк Л.М. Трансформация пылевых структур в разряде постоянного тока в неоне // Прикладная физика – 2015. – № 4. – С. 27–32.
16. Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Abdirakhmanov A.R., Dosbolayev M.K. and Ramazanov T.S. Voids in Dusty Plasma of a Stratified DC Glow Discharge in Noble Gases // Contrib. Plasm. Phys. – 2016. – V. 56. – P. 234–239.
17. Shumova V.V., Polyakov D.N., Vasilyak L.M. Neon dc glow discharge at cryogenic cooling: experiment and simulation // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – V. 50. – P. 405202.

Поступила в редакцию 25 февраля 2018 г.

UDC 537.525

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-22-27

Phase transitions in dust structures in glow discharge in neon at cryogenic temperature

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

Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13; Bd. 2; cryolab@ihed.ras.ru

With the decrease of temperature, the “condensation” of dust particles with the formation of clusters has been detected. The transformation of complex dust structures with the change of the current of glow discharge in neon at a pressure of 20 Pa and a temperature of 77 K has been studied. The effect of discharge current on the shape and composition of dust structures consisting of dust clusters formed at cryogenic temperature in neon has been investigated. Depending on the value of the discharge current, the features of first- and second-order phase transitions in dust structures and mesomorphic states of dusty plasma were found.

Keywords: *dusty plasma, structures of charged dust particles, dust clusters, phase transition, glow discharge, neon, cryogenic temperature.*

Received 25 February, 2018