

ЯВЛЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ В УЛЬТРАХОЛОДНОЙ КОЛЛОИДНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ СВЕРХТЕКУЧЕГО ГЕЛИЯ*

Кандидат физико-математических наук БОЛТНЕВ Р.Е.,
доктор физико-математических наук ВАСИЛЬЕВ М.М.,
доктор физико-математических наук, академик РАН ПЕТРОВ О.Ф.
(ОИВТ РАН, МФТИ)

DOI: 10.7868/50233361920110014

Впервые исследовано поведение частиц в пылевой плазме при температуре ниже 2 К, что соответствует $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты экспериментов в будущем могут быть использованы для создания новых материалов с заданными и контролируемыми свойствами.

Введение

Явления самоорганизации в природе чрезвычайно разнообразны. Их можно встретить в диссипативных системах

различной сложности и масштабности: от физических систем, изучаемых в наномире и астрономии, биологических структур и до социально-экономических процессов, имеющих место в социуме. Самоорганизация присуща всем открытым неравновесным системам, состоящим из нелинейно взаимодействующих компонентов.

Коллоидная (пылевая) плазма, образованная микроскопическими заряженными частицами, левитирующими в плазме газового разряда, является примером таких систем. Интенсивное рассеяние света микроскопическими частицами позволяет напрямую наблюдать за движением частиц и определять их координаты и скорости. В том числе поэтому коллоидная плазма является уникальным объектом для изучения различных явлений самоорганизации. Так, плазменно-пылевые системы позволяют проводить исследования в гораздо более широком диапазоне температур нейтрального газа по сравнению с альтернативными системами, например, такими как кластеры из капель воды, парящими над горячими поверхностями и многими другими.

* Antipov, S.N., Vasiliev, M.M. & Petrov, O.F. Non-ideal dust structures in cryogenic complex plasmas. *Contrib. Plasm. Phys.* 52, 203–206 (2012).

Р.Е. Болтнев, М.М. Васильев, Е.А. Кононов, О.Ф. Петров, Явления самоорганизации в криогенной газоразрядной плазме: формирование пылевого облака наночастиц и плазменно-пылевых волн. *ЖЭТФ*, том 153, вып. 4 (2018).

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. *www.nature.com/scientificreports/*. *Scientific reports* (2019) 9:3261 | <https://doi.org/10.1038/s41598-019-40111-w>
Boltnev, R.E., Kononov, E.A., Trukhachev, F.M., Vasiliev, M.M., & Petrov, O.F. Synthesis of nanoclusters and quasi one-dimensional structures in glow discharge at $T \approx 2\text{ K}$. *Plasma Sources Science and Technology*. (2020).doi:10.1088/1361-6595/aba2ab

Специалисты ОИВТ РАН и МФТИ впервые в мире наблюдали многокомпонентную пылевую плазму в положительном столбе тлеющего разряда при сверхнизких температурах (температурах сверхтекучего гелия). В ходе экспериментов были получены структуры в газовом разряде, охлаждаемом сверхтекучим гелием, при температуре 1.6–2 К. Ранее коллоидная плазма и даже газовые разряды в лабораторных условиях не исследовались при температурах ниже 4.2 К (температура жидкого гелия).

Экспериментальная установка и методика исследований

Установка для исследования криогенной гелиевой плазмы и плазменно-пылевых структур была разработана в ИВТАНе на базе оптического криостата Janis SVT-200. Эксперименты с разрядом постоянного тока проводились в вертикально ориентированной стеклянной трубке, помещенной во внутренний канал криостата. Нижний конец разрядной трубки (вплоть до положения пылевой плазменной структуры) погружался в жидкий гелий при температуре ниже 4.2 К. Температуру жидкого гелия в криостате дополнительно понижали до 1.6 К посредством откачки паров жидкого гелия.

Ввод пылевых частиц в область разряда осуществлялся инжектором, расположенным в верхней части корпуса разрядной трубки. Инжектор заполнялся полидисперсными частицами оксида церия- CeO_2 (размером от 0.1 до 100–200 мкм). Эти инжестированные частицы попадали в положительный столб разряда, где происходила их ионизация и захват в страты. Таким об-

разом формировались плазменно-пылевые структуры, которые наблюдались и изучались на уровне оптических окон, путем введения специального диэлектрического конуса, фокусирующего электронный поток на оси разрядной трубки.

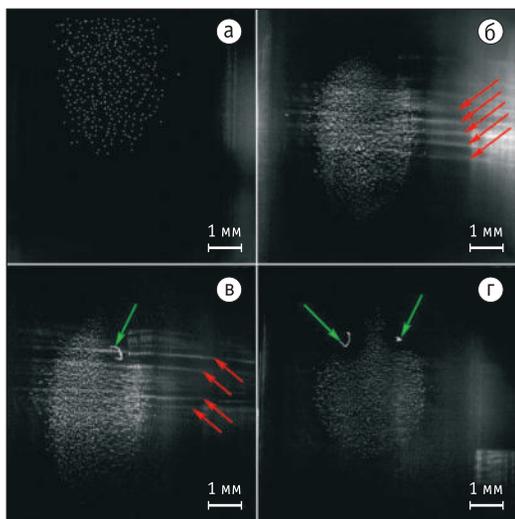
Движение частиц в плазменно-пылевой структуре регистрировалось высокоскоростной видеокамерой со скоростью до 300 кадров/с. Структуры освещались лазерным “ножом” (высотой 8 мм и шириной 0.22 мм), вводимым в криостат через оптическое окно под прямым углом к оси высокоскоростной видеокамеры.

Результаты исследований

Трансформация пылевой плазменной структуры в интервале температур от 1.63 до 2.16 К показана на рисунке.

На рис. а представлена сфероидальная пылевидная плазменная структура при температуре 1.63 К. Размер структуры от 2 до 5 мм, обычно высота была больше диаметра. Структура состоит из хаотически движущихся быстрых и медленных частиц, скорости которых изменяются более чем на порядок. Некоторые быстрые частицы создавали интенсивные вихревые потоки на боковой поверхности пылевой плазменной структуры. Среднее расстояние между частицами в структуре составляло 120 ± 15 мкм.

Облако наночастиц (рис. б) появилось в поле зрения примерно через 1000 с после зажигания тлеющего разряда. Высота облака была аналогична высоте пылевой структуры из оксида церия, но оно заполняло практически весь диаметр разрядной трубки. Облако распознавалось по рассеянию лазерного света на его модуляции плотности.



Трансформация плазменно-пылевой структуры в диапазоне температур от 1.63 до 2.16 К:

(а) пылевидная плазменная структура, образованная частицами CeO_2 при $T = 1.63$ К; (б) пылевидная плазменная структура и волны в облаке полимерных наночастиц, $T = 2.0$ К; (в) пылевидная плазма состоящая из частиц CeO_2 , облако полимерных наночастиц и сплошная нить, $T = 2.0$ К; (г) пустоты вокруг твердых волокон, левитирующих внутри пылевой плазменной структуры, образованной частицами CeO_2 , $T = 2.16$ К.

Красные стрелки указывают на волны плотности внутри облака наночастиц. Зеленые стрелки указывают на твердые волокна.

Наиболее интенсивные волны плотности, отмеченные на рис. б, в красными стрелками, соответствовали коллективному колебательному движению наночастиц. Частота этих колебаний уменьшалась от 48 до 20 Гц при повышении температуры от 1.69 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 не изменилась и составила 0.37 ± 0.03 мм. В зоне нало-

жения с пылевой структурой из крупных частиц пустот не наблюдалось.

Отдельные твердые нити начинали входить и покидать поле зрения через несколько минут после появления облака наночастиц. Эти нити отмечены зелеными стрелками на рис. в, г. Короткие нити длиной ~ 0.1 мм скручены, скорость их вращения превышала 100 об/с.

Вокруг нитей в облаках наночастиц пустот не наблюдалось (рис. в), однако в области контакта с плазменно-пылевой структурой образовывался void размером 0.3–0.4 мм (рис. г).

Нити обычно левитировали на одной высоте относительно центра сфероидальной структуры. Облако наночастиц наблюдалось в интервале температур 1.6–2 К. Филаменты были видны в поле зрения до температуры 4.4 К.

При разрушении плазменно-пылевой структуры из-за выключения тлеющего разряда, частицы электрическим полем “отбрасывались” на стенку газоразрядной трубки. Осевшие на стенке трубки частицы и волокна собирались углеродной лентой и исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии и рентгеновского энергодисперсионного (EDX) микро.

Анализ результатов и выводы

В ходе экспериментов наблюдались явления формирования полимерных нанокластеров с размерами менее 100 нм, и полимерных волокон длиной до 5 мм и диаметром около 10 мкм. Полученные при экстремальных криогенных температурах волокна не разрушались, попадая в нормальные условия.

Экспериментально показано, что интенсивное рассеяние лазерного излучения частицами позволяет наблюдать и исследовать системы, образованные

заряженными частицами, отслеживая их координаты и скорости в реальном масштабе времени. В этой связи коллоидная плазма является уникальным объектом для исследования разнообразных явлений, например трехмерных и двумерных фазовых переходов, а также формирования нелинейных волн в широком диапазоне температуры плазмообразующего газа.

Малая изученность плазмы газового разряда при температурах ниже 4.2 К связана с тем, что проблемой является не только достижение температуры жидкого гелия, чтобы использовать его для охлаждения разрядной трубки, но также ограничение на мощность, выделяемую в разряде и приводящую к разогреву газообразного гелия.

Результаты экспериментов показали, что при сверхнизких температурах ста-

новится возможным прецизионно контролировать состав распыляемых материалов, так как в этих условиях любые примеси “вымерзают”, выпадая в осадок. В итоге в газообразном гелии при распылении вещества возможно получить сверхчистые материалы, и это может стать путем к получению волокон с новыми заданными свойствами: например, новых видов полимеров, которые невозможно получить обычным химическим путем. Такие материалы могут радикально отличаться от существующих аналогов.

В настоящее время специалисты ОИВТ РАН и МФТИ планируют продолжить эксперименты и изучать явления самоорганизации в коллоидной плазме при сверхнизких температурах с использованием различных перспективных дисперсных материалов.



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА
1727
naukapublishers.ru

ЭКСКЛЮЗИВНЫЙ ПЕРЕПЛЕТ

Рисунок на коже
Все виды тиснения
Кожаный переплет
Рельефное тиснение
Клише любой сложности
Полноцветная роспись обзоров
А также адресные папки, дипломы, футляры

Берёмся за работы любой сложности!
По всем интересующим вопросам пишите на почту kiseleva@tnauka.ru

реклама

“Энергия: экономика, техника, экология” 11/2020