

УДК 537.525.1.

ОТБОР ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ РАЗРЯДЕ

© 2024 г. Л. А. Новиков^{а,*}, М. А. Гасилов^а, М. С. Голубев^а, М. Б. Морозова^а,
Е. С. Дзлиева^а, С. И. Павлов^а, В. Ю. Карасев^{а,**}

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: l.novikov@spbu.ru

**e-mail: plasmadust@ya.ru

Поступила в редакцию 25.04.2024 г.

После доработки 06.06.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Впервые изучен отбор пылевых частиц в объемной плазменно-пылевой ловушке в безэлектродном высокочастотном разряде индукционного типа в неоне. Подобраны условия разряда и конструкция разрядной камеры, при которых в образовавшейся пылевой ловушке созданы пылевые структуры из полидисперсных частиц кварца протяженностью до 1.5 см с числом частиц до 4000. Статистический анализ размеров уловленных частиц показал, что в выбранных условиях средний размер частиц близок к 4 мкм и слабо зависит от давления газа неона в широком интервале от 0.25 до 1.0 Торр. Обнаружено, что сформированная объемная пылевая структура обладает аномально большим изменением продольного межчастичного расстояния по сравнению с пылевой плазмой в тлеющем разряде. Характерный размер уловленных частиц оценен на основе вертикального баланса сил, действующих на пылевую частицу. Показано, что по ряду параметров метод отбора частиц в высокочастотном разряде индукционного типа более предпочтителен, чем аналогичный метод, используемый в тлеющем разряде в стратах, а примененная пылевая ловушка может использоваться для исследования объемной пылевой плазмы в магнитном поле.

Ключевые слова: высокочастотный (ВЧ) индукционный разряд в неоне, пылевая плазма, пылевая ловушка, сепарация порошковых частиц, условия левитации пылевых частиц

DOI: 10.31857/S0367292124080068, EDN: OBBVLC

1. ВВЕДЕНИЕ

Объемные пылевые структуры по сравнению с монослойной пылевой плазмой обладают более широким спектром уникальных свойств: это объемные упаковки пылевых частиц, анизотропия кристаллической решетки, существенные градиенты электрических и кинетических параметров, задаваемых особенностями разрядной плазмы [1–4], с одной стороны. С другой стороны, монослойные пылевые структуры обладают высокой однородностью, например, создаваемые в области над нижним электродом ВЧ-разряда емкостного типа [5–6]. Для создания объемной пылевой плазмы применяется разряд постоянного тока в стоячих стратах [7], в областях поворота [8] и сужения канала тока [9, 10], при наложении на разряд сильно

неоднородного магнитного поля [11]. Особый интерес представляют комбинированные разряды, в частности, в условиях микрогравитации. Наложение обжимающих колец на нижний электрод высокочастотного (ВЧ) емкостного разряда используется для искажения распределения потенциала и растягивания предложа для формирования нескольких сечений пылевой структуры [12].

Создание объемной пылевой плазмы в безэлектродном ВЧ-разряде индукционного типа (ВЧИ) было осужено в работах [13, 14]. В работе [15] такие структуры получались при очистке ВЧ-разрядом полидисперсного засыпного порошка. В [16] при отсутствии постоянного тока собственное вращение пылевых частиц изучалось в поперечном к разрядной трубке магнитном поле.

Из данных работ известно, что пылевая плазма в ВЧ индукционном разряде существует в магнитном поле с индукцией до 700 Гс. Прежде всего, интерес к изучению пылевой плазмы в ловушке без протекания тока связан с использованием разряда, лишенного ряда неустойчивостей в магнитном поле [17], а также с особенностью пространственного распределения параметров плазмы [18, 19], существенно отличающихся от диффузных распределений, например, в стоячих стратах. Это может придать пылевой плазме новые свойства.

В ВЧИ-разряде взаимодействие потока плазмы с поверхностью пылевой частицы не так интенсивно, как, например, в тлеющем разряде [20]. Как следствие, деградация калиброванных частиц меламин-формальдегида и распыление их материала согласно [21] происходит с меньшей скоростью. Известно [22], что в ВЧИ-разряд с индуктором в форме боковых витков (колец) мощность вкладывается в пристеночном слое трубки, радиальное распределение основных параметров плазмы (плотность и температура электронов, электрическое поле) изменяются. Для создания пылевых ловушек это представляет интерес, поскольку принципиально отличается от тлеющего разряда, где в случае малого тока ионизация происходит в тонкой приосевой области, и распределение плазмы по радиусу спадает существенно круче [18, 19]. Кроме того, в безэлектродном разряде отсутствует распыление катода, приводящее к загрязнению плазмы и изменению газового состава, а также к изменению ионного состава плазмы, если испаряются элементы с более низким потенциалом ионизации, чем у буферного газа [23].

Исследования пылевой плазмы в безэлектродном ВЧИ-разряде полезны для ряда приложений. В ВЧИ-разряде формируется трехмерная структура, но при этом отсутствует ток разряда. Эти условия более выгодны для работы в магнитном поле, поскольку отсутствуют неустойчивости, связанные с протеканием тока [17, 24]. Целью работы является создание в эксперименте в ловушке в ВЧИ-разряде объемной устойчивой пылевой структуры и исследование ее геометрии, а также нахождение параметров составляющих ее частиц. Для этого проведен подбор условий для создания обширной устойчивой пылевой структуры, способной служить объектом исследования в магнитном поле. Также пылевые частицы ис-

пользовались как своеобразные «пылевые зонды» [25–27], поскольку, используя данные о сепарации пылевых частиц в ловушке в данном разряде, можно делать более точные оценки параметров ловушки и сил, действующих на частицы, в частности, в магнитном поле.

Представленная статья организована следующим образом. В разд. 2 описана экспериментальная установка, выбор параметров эксперимента и метод улавливания пылевых частиц из разряда. Далее представлена методика определения параметров уловленных частиц. В разд. 3 даны экспериментальные результаты и приведены численные оценки, при этом главный результат состоит в том, что получена зависимость размеров частиц от давления газа разряда.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1а. Использовалась разрядная трубка для исследования сепарации частиц в тлеющем разряде в неоне [8, 9]. В вертикальном участке трубки зажигался ВЧ индукционный разряд. Источником разряда служил индуктор из двух витков литцендрата 21×0.07 и лампового ВЧ-генератора, собранного по схеме мс переменным сечением (2.6 и 2.3 см), и использовались калиброванные частицы меламин-формальдегида с плотностью 1.5 г/см^3 и размером 1,1 мкм и 5,19 мкм. Мелкие частицы левитировали во всех сечениях трубки в широком диапазоне давления неона. В области трубки с диаметром 2.6 см крупные частицы не левитировали. В области трубки с диаметром 2.3 см при некоторых подобранных условиях (давлении и вкладываемой мощности) из них получалась единственная короткая пылевая цепочка. Следующим этапом было использование калиброванных частиц размером 2 мкм. В узкой части трубки пылевая структура при давлении неона 0.25–0.33 Торр оказалась достаточно объемной. Далее было решено для основного исследования с более тяжелыми полидисперсными частицами кварца плотностью 2.5 г/см^3 диаметр трубки сделать еще меньше. В итоге была изготовлена трубка диаметром 1.9 см, в которой удалось создать объемную и устойчивую пылевую структуру, которая содержала около 4000 частиц, пример ее и показан на рис. 2.

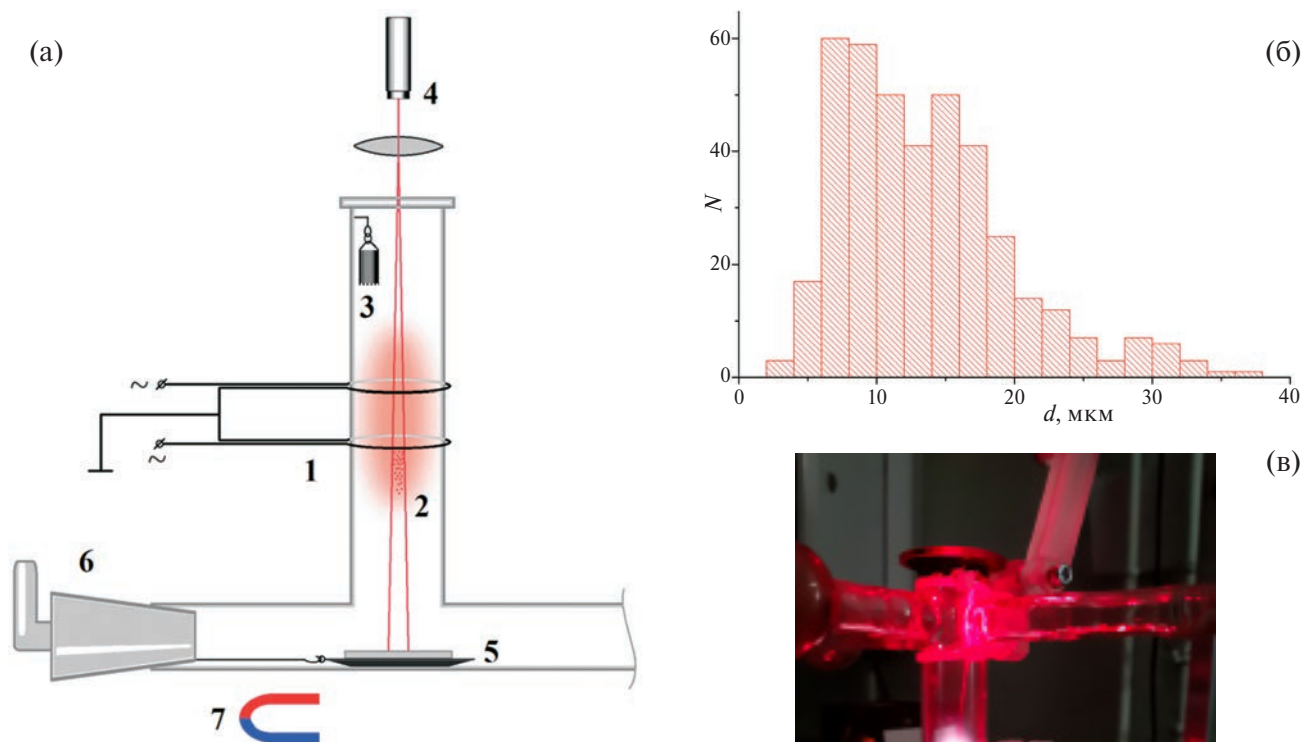


Рис. 1. а) Схема экспериментальной установки. Обозначения: 1 – индуктор; 2 – пылевая структура; 3 – контейнер для инъекции пылевых частиц в разряд; 4 – система подсветки; 5 – каретка с лежащим на ней предметным стеклом для сбора частиц; 6 – вакуумный кран для извлечения каретки; 7 – магнит для передвижения каретки внутри трубки. б) Гистограмма распределения размеров засыпного порошк. в) Фотография установки.

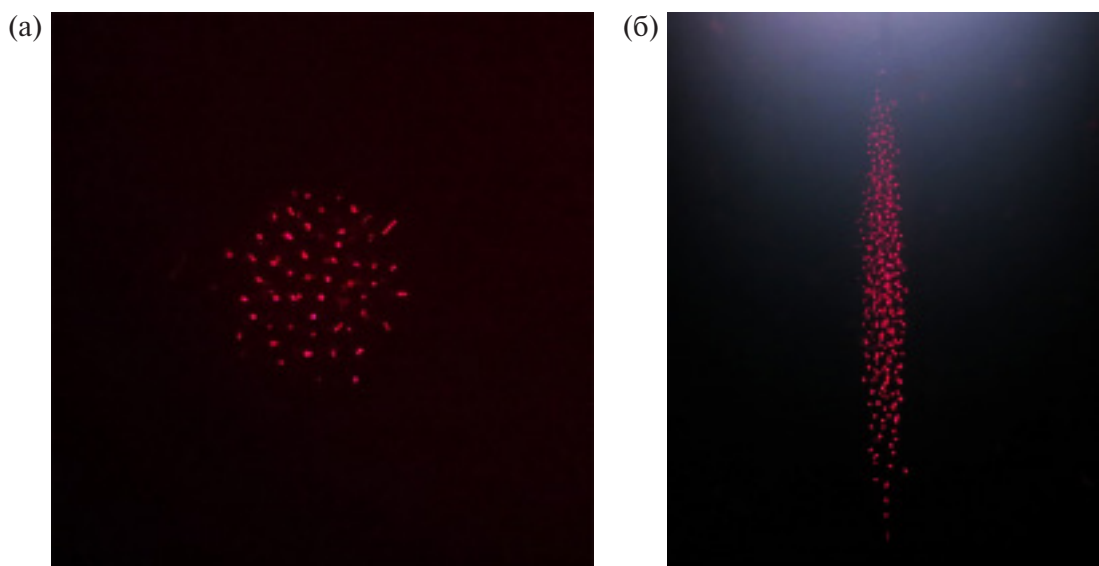
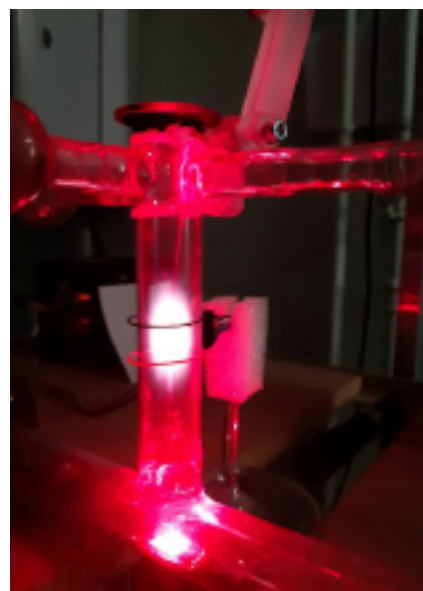


Рис. 2. Структура в пылевой ловушке в ВЧИ-разряде, созданная из полидисперсных частиц кварца. Условия: газ неон, давление – 0.4 Торр, напряжение – 180 В, частота ВЧ-генерации – 40 МГц, диаметр трубки – 1.9 см. а) Фото горизонтального сечения пылевой структуры. Высота изображения – 4.7 мм. б) Фото вертикального диаметрального сечения пылевой структуры. Высота изображения – 18 мм.

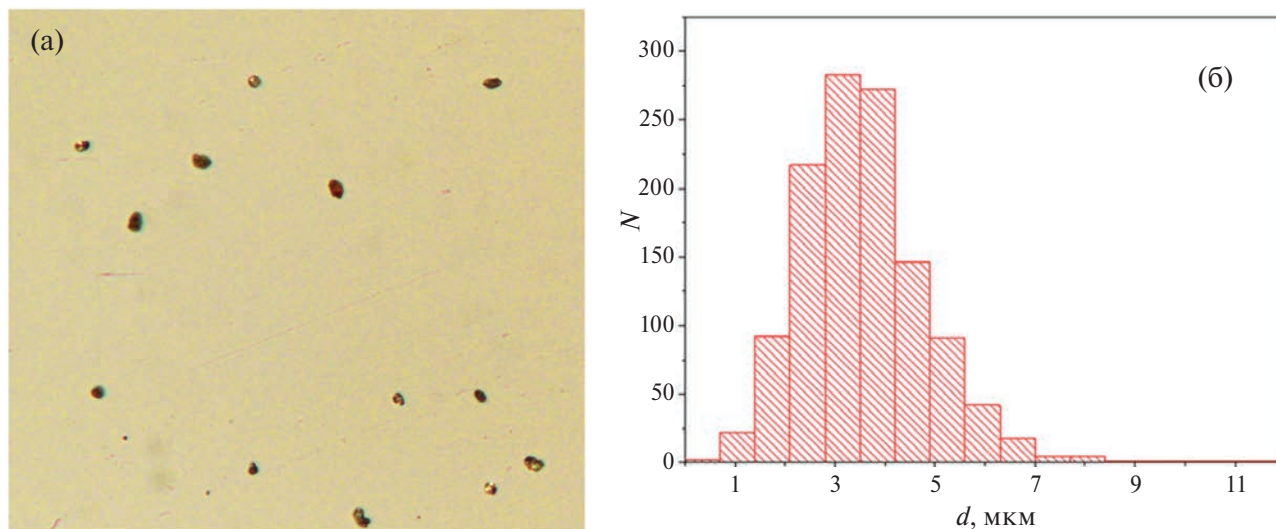


Рис. 3. а) Фото осажденных из ВЧИ-разряда пылевых частиц. Размер частиц — около 4 мкм. Ширина изображения — 200 мк. б) гистограмма распределения пылевых частиц по характерному размеру. Условия: газ неон, давление — 0.5 Торр, напряжение — 100 В, частота ВЧ-генерации — 40 МГц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОТБОРА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена зависимость средних размеров пылевых частиц, извлеченных из пылевой ловушки, от давления газа. Характерный размер пылевой частицы на графике рис. 4 не существенно зависит от давления неона. При следующих условиях: $p = 0.45$ Торр, $U = 100$ В характерный размер частиц равен $d = 3.8$ мкм. Выполним численную оценку сил, действующих на пылевую частицу для данных условий. Выбор этих параметров позволил получить достаточно большую пылевую структуру и сопоставить полученные

результаты с аналогичными по давлению и мощности для условий в тлеющем разряде [28–29], а также использовать результаты зондовых измерений, выполненных авторами в [21], и других измерений этих авторов, действующих в приведенных условиях на модельную частицу сферической формы радиуса $a = 1.9$ мкм.

Во-первых, расчет силы тяжести

$$mg = (4/3) \pi a^3 \rho g \quad (1)$$

дал следующее значение величины $mg = 0.7$ пН.

На диффузионном крае плазмоида, согласно [14, 30, 31], параметры плазмы можно принять следующими: концентрация ионов $n_i = 1.7 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$,

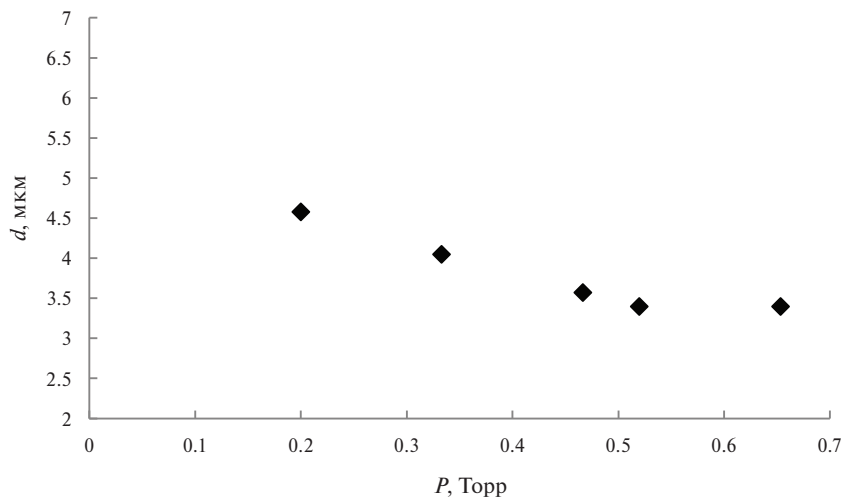


Рис. 4. Зависимость среднего размера пылевых частиц от давления неона. Условия: напряжение — 100 В, частота ВЧ-генерации — 40 МГц.

электронная температура $T_e = 3,4$ эВ, электрическое поле $E_{\parallel} = 8$ В/см. Для оценки сил, имеющих электрическую составляющую, рассчитаем заряд пылинки из следующих параметров: при $\tau = 3,4/0,03 \sim 10^2$ ($\tau = T_e/T_i$) безразмерный заряд пылинки, вычисленный для неона на основании подхода OML [32], оказался равным $z = 2,2$. Соответствующее ему зарядовое число равно $Z_d = 10^4$, тогда электрическая удерживающая сила

$$q_d E_{\parallel} = Z_d e E_{\parallel} \quad (2)$$

оценена как $q_d E_{\parallel} = 1,15$ пН.

В выражении для силы ионного увлечения [32]

$$F_{id} = (8\sqrt{2\pi/3}) n_i m_i a^2 V_{Ti} V \left\{ 1 + \zeta\tau/2 + (\zeta\tau/2)^2 \Pi \right\} \quad (3)$$

направленная скорость иона $V = b_i E_{\parallel}$, b_i – подвижность ионов, концентрация ионов n_i , m_i – масса иона неона, V_{Ti} – тепловая скорость иона и Π – модифицированный (проинтегрированный по распределению ионов) кулоновский логарифм, для наших условий он принят равным $\Pi = 1$ [32]. Сила F_{id} оценена в 0.45 пН. В данных условиях может также работать сила термофореза F_{th} . Тогда вертикальный баланс сил дается выражением

$$q_d E_{\parallel} = mg + F_{id} + F_{th}. \quad (4)$$

Но в используемой разрядной трубке измерения выявили лишь очень малый продольный градиент температуры газа. Конечно же существует, нагрев трубки в области индуктора. Но измерения температуры в верхнем и нижнем (более массив-

ных стеклянных) участках разрядной камеры, рис. 1, удаленных примерно на 4 см от индуктора, показали то же значение, что и в области индуктора (на уровне погрешности измерения). Поэтому силой термофореза, оцениваемой не более 0.1 пН в балансе сил мы пренебрегаем.

Таким образом, точное знание размеров отсепарированных ВЧИ плазмой частиц, измеренное в эксперименте, и оцененное из баланса сил, позволяет убедиться в соответствии выбранных параметров разряда. Как результат, устойчивые объемные пылевые структуры в ВЧИ-разряде могут быть использованы для исследования в магнитном поле. Также данный разряд можно использовать для сепарирования порошков. Вероятно, что в ВЧИ-разряде без электродов метод сепарации будет более удобным в практической работе, а также менее затратным по вкладываемой ВЧ-мощности, чем ранее развитый метод в тлеющем разряде [8–9, 28–29].

На рис. 5 представлены продольные межчастичные расстояния D в плазменно-пылевой структуре в зависимости от расстояния от индуктора (от вертикальной координаты), при одном значении давления газа. Изменение продольного расстояния оказалось существенным, и, в зависимости от условий, оно меняется до 6 раз на длине структуры до 1.5 см. Заметим, что уверенного изменения радиального расстояния во всем диапазоне давления мы не обнаружили, что соответствует [13, 14]. Мы полагаем, что при плани-

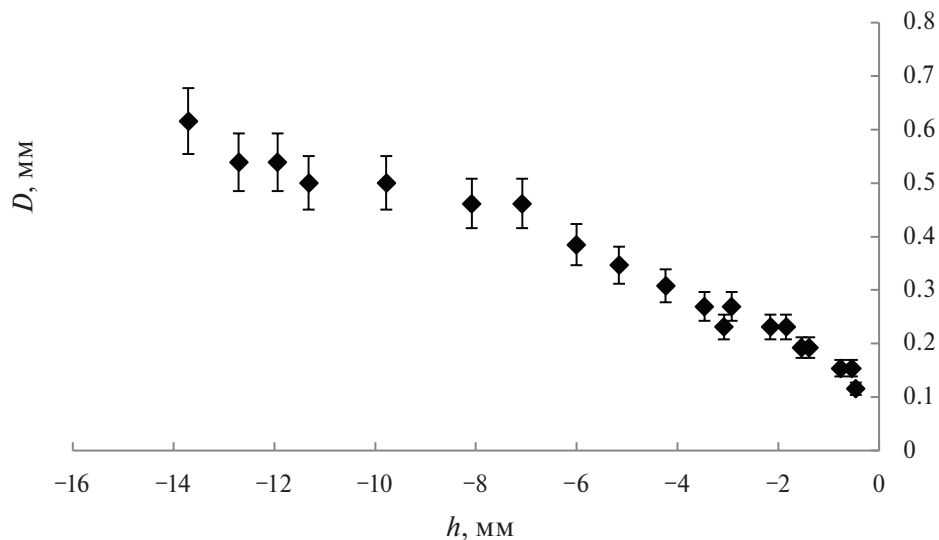


Рис. 5. Продольное межчастичное расстояние. Условия: газ неон, давление — 0.6 Торр, полидисперсный кварц. Координата отсчитывается от нижнего витка индуктора.

ровании изучения динамики вращения пылевых структур в ВЧИ-разряде в магнитном поле, сведения о продольном градиенте межчастичного расстояния могут быть полезны. Измеренное продольное расстояние между частицами менялось от 0.1 мм в непосредственной близости от индуктора до примерно 0.8 мм на диффузном крае при всех использованных давлениях.

Можно предположить, что возможно несколько факторов, влияющих на изменение продольного межчастичного расстояния. Во-первых, это изменение концентрации ионов и, соответственно, длины экранирования на длине структуры. По данным [14, 30] можно оценить, что на расстоянии, 1.5 см отношение длин ионного экранирования может достигать 4. Во-вторых, это изменение размеров частиц на длине структуры. Отношение максимального и минимального размеров частиц, извлеченных из плазмы (см. рис. 3б и данные при других давлениях), лежит в диапазоне от 3 до 5 мкм, соответственно, так же может изменяться заряд частиц. По визуальным наблюдениям и фотографиям частиц в структуре мы полагаем, что внизу левитируют крупные частицы, а ближе к индуктору мелкие. Возможно, что оба оцененных фактора влияют на изменение продольного межчастичного расстояния, но в разной мере. Влияние же термофореза, существенно меняющего межчастичные расстояния в условиях тлеющего разряда [33], по нашим оценкам достаточно мало.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые изучена сепарация полидисперсных пылевых частиц в условии безэлектродного ВЧИ-разряда низкой мощности и давления. В эксперименте создана объемная пылевая структура, содержащая около 4000 частиц.

Определен средний размер левитирующих в плазменной ловушке пылевых частиц, в диапазоне давлений газа разряда p от 0.2 до 0.65 Торр. Обнаружено, что средний размер не существенно зависит от давления газа и он близок к 4 мкм.

Измерены продольные межчастичные расстояния в объемной пылевой структуре, они изменяются до 6 раз на высоте структуры 1.5 см. Проведены численные оценки баланса сил с использованием измеренных и литературных данных.

Сделаны выводы о возможности использования объемной пылевой ловушки в ВЧИ-разряде

для исследования пылевой плазмы в магнитном поле, а также для сепарации порошков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Зобнину за полезные обсуждения условий ВЧИ-разряда.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 22-72-10004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chu J.H., Lin I.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 72. P. 4009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.4009>
2. *Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., et al.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73 (5). P. 652. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.73.652>
3. *Hayashi Y.* Structure of a Three-Dimensional Coulomb Crystal in a Fine-Particle Plasma. Phys Rev Lett. 1999. V. 83. 4764. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4764>
4. *Фортв В., Морфилл Г., eds.* Комплексная и пылевая плазма: Из лаборатории в космос. М.: Физматлит, 2012.
5. *Morfill G.E., Thomas H.M., Konopka U., Zuzic M.* // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. P. 1769. <https://doi.org/10.1063/1.873435>
6. *Vasilieva E.V., Petrov O.F., Vasiliev M.M.* // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 523. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80082-x>
7. *Лунаев А.М., Молотков В.И., Нефедов А.П. и др.* // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. С. 2030.
8. *Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu.* // Tech. Phys. 2012. V. 57. P. 145. <https://doi.org/10.1134/S1063784212010070>
9. *Дзлueva E.C., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 591.
10. *Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 085020. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab36ac>
11. *Dzlieva E.S., D'yachkov L.G., Novikov L.A., et al.* // Molecules. 2021. Т. 26. С. 3788. <https://doi.org/10.3390/molecules26133788>
12. *Choudhary M., Bergert R., Moritz S., et al.* // Contrib. Plasma Phys. 2021. V. 61. P. e202000110. <https://doi.org/10.1002/ctpp.202000110>
13. *Герасимов Ю.В., Нефедов А.П., Синельщиков В.А., Фортв В.Е.* // ПЖТФ. 1998. Т. 24. С. 62.
14. *Fortov V.E., Petrov O.F., Usachev A.D., Zobnin A.V.* // Phys. Rev. E. 2004. V. 70. P. 046415. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.046415>
15. *Дзлueva E.C., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. С. 1018.

16. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И. и др. // ЖТФ. 2019. Т. 89 (1). С. 50.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2019.01.46961.71-18>
17. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971.
18. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
19. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. СПб.: Лань, 2010.
20. Голубовский Ю.Б., Кудрявцев А.А., Некучаев В.О., и др. Кинетика электронов в неравновесной газоразрядной плазме. СПб.: СПбГУ, 2004.
21. Stoffers W.W., Stoffers E., Swinkels G.H.P.M., et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. 2302.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.2302>
22. Кралькина Е.А. // УФН. 2008. Т. 178. С. 519.
<https://doi.org/10.3367/UFN.0178.200805f.0519>
23. Майоров С.А. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. С. 869.
24. Недоспасов А.В., Хаит В.Д. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1979.
25. Kersten H., Deutsch H., Otte M., et al. // Thin Solid Films. 2000. V. 377–378. P. 530.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01439-5](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01439-5)
26. Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Pavlov S.I. // EPL. 2015. V. 110. P. 55002.
<https://doi.org/10.1209/0295-5075/110/55002>
27. Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Эйхвальд А.И. // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. С. 521.
28. Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю. // ЖТФ. 2012. Т. 82 (7). С. 51.
29. Дзлиева Е.С., Майоров С.А., Новиков Л.А., и др. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. С. 914.
<https://doi.org/10.31857/S0367292122600741>
30. Петров О.Ф., Усачев А.Д., Зобнин А.В. // Научные труды Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН / Под. ред. В.Е. Фортова и А.П. Лихачева. М.: ОИВТ РАН, 2004. Вып. 6. С. 267.
31. Fortov V.E., Nefedov A.P., Sinel'shchikov V.A., et al. // Phys. Lett. A. 2000. V. 267 P. 179.
[https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(00\)00072-4](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(00)00072-4)
32. Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., et al. // Usp. Fiz. Nauk. 2004. V. 174. P. 495.
<https://doi.org/10.3367/UFN.0174.200405b.0495>
33. Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е. // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. С. 1166.

SELECTION OF DUST PARTICLES IN RADIO FREQUENCY INDUCTIVE DISCHARGE

**L. A. Novikov^{a,*}, M. A. Gasilov^a, M. S. Golubev^a, M. B. Morozova^a, E. S. Dzlieva^a,
S. I. Pavlov^a, V. Yu. Karasev^{a,**}**

^aSt. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*e-mail: l.novikov@spbu.ru

**e-mail: plasmadust@ya.ru

Selection of dust particles in three-dimensional plasma–dust trap in the electrodeless radio frequency inductive discharge in neon was studied for the first time. The discharge conditions and the discharge chamber design were chosen so that the dust structures of polydisperse quartz particles are created in the resulting dust trap. The structure lengths were of up to 1.5 cm and the number of particles in them was of up to 4000. Statistical analysis of the sizes of trapped particles has shown that under the conditions chosen the average particle size is close to 4 μm , and in a wide range from 0.25 to 1.0 Torr, it weakly depends on neon pressure. It was found that in the three-dimensional dust structure formed, the longitudinal interparticle distance changes in anomalously wide range, as compared to the dust structures formed in plasma of glow discharge. The characteristic size of the trapped particles was estimated based on the vertical balance of forces acting on dust particle. It was shown that, in terms of a number of parameters, the method of particle selection in radio frequency inductive discharge is preferable, as compared to similar method used in glow discharges in strata, and the dust trap applied can be used for studying three-dimensional dusty plasmas in the magnetic field.

Keywords: radio frequency (RF) inductive discharge in neon, dusty plasma, dust trap, separation of powder particles, conditions for levitation of dust particles