

04

Пылевая плазма в тлеющем разряде в магнитном поле до 3000 G

© Е.С. Дзलिएва, Л.А. Новиков, С.И. Павлов, В.Ю. Карасев[¶]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,
Россия[¶] E-mail: v.karasev@spbu.ru

Поступило в Редакцию 21 июня 2018 г.

Представлены результаты первых экспериментов по созданию пылевой плазмы в диапазоне умеренного магнитного поля до величины 3000 G в тлеющем разряде в ловушке в области сужения канала тока. Получены устойчивые пылевые структуры, вращающиеся с рекордно большой угловой скоростью до 15 rad/s. Построена зависимость угловой скорости от магнитного поля, дана количественная интерпретация, основанная на действии силы ионного увлечения.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.19.46684.17430

Магнитное поле является продуктивным воздействием на пылевую плазму при ее экспериментальном исследовании и количественной диагностике. В последние 20 лет комплексная плазма стала самостоятельной областью физики плазмы [1,2]. Она характеризуется как открытая диссипативная система, в которой некоторые физические свойства имеют относительно высокие/низкие значения. Так, удельный заряд пылевой частицы близок к единице, но абсолютное значение заряда крайне велико (до 10^6 элементарных зарядов), что приводит к сильной корреляции и упорядочиванию пылевой компоненты плазмы, а также к экстремально интенсивным потокам плазменных частиц на пылевую частицу. Магнитное поле избирательно (в зависимости от используемого диапазона) действует на пылевую плазму, преимущественно через плазменные потоки. Сегодня исследования пылевой плазмы в магнитном поле являются востребованными, а диапазон используемых магнитных полей распространяется на сильные поля, где может быть замагниченной ионная компонента плазмы [3].

В настоящей работе сообщается о пионерском исследовании пылевой плазмы в магнитном поле. Отметим наиболее важные аспекты. Во-первых, пылевая плазма создается в тлеющем разряде. До сих пор подобные исследования ограничивались областью слабого магнитного поля [4,5]. В работе [5] максимальное его значение, при котором формировалась пылевая плазма в стратах, было 700 G. В силу сложности работы с тлеющим разрядом в магнитном поле исследования пылевой плазмы сегодня проводятся только в условиях высокочастотного (ВЧ) разряда [6–8]. Во-вторых, следуя предыдущему исследованию [9], мы применяем пылевую ловушку в тлеющем разряде, альтернативную ловушке в стоячей страте. Пылевая структура в разряде постоянного тока может формироваться в области резкого сужения канала тока [10]. Как оказалось, в слабом магнитном поле [9] и в области умеренного магнитного поля до 3000 G в настоящей работе данная ловушка является довольно устойчивой к его воздействию. Это открывает возможность проведения экспериментов с пылевой плазмой в магнитном поле в тлеющем разряде, где взаимодействие с плазменными потоками очень интенсивно, что важно для изучения динамики взаимодействия. Одним из важнейших результатов является получение аномально большой угловой скорости вращения пылевой структуры — до 15 rad/s, что на три порядка выше, чем, например, в сильных магнитных полях в условиях ВЧ-разряда [7,8] и в 5 раз выше, чем в условиях тлеющего разряда [4,5].

Эксперименты выполнялись в длинной разрядной трубке, способной размещаться внутри криостата сверхпроводящего магнита с теплым отверстием диаметром 6 см. В трубку помещалась специальная диэлектрическая вставка, сужающая канал тока и стабилизирующая разряд. Схема вставки и пылевой структуры в ловушке приведена на рис. 1. Вставка имела область сужения до диаметра 5 mm. Разряд зажигался в неоне при давлении $p = 0.4$ Torr и токе $i = 1.3$ mA. Пылевая структура формировалась в области однородного магнитного поля, созданного сверхпроводящим соленоидом длиной 20 см. Горизонтальное сечение структуры было подсвечено сбоку через перископическую систему. Через торцевое отверстие трубки рассеянный частицами свет регистрировался видеокамерой с длиннофокусной оптической системой и матрицей 640×480 px со стандартной частотой съемки. Для формирования пылевой структуры использовались полидисперсные частицы кварца с размерами 1–10 μm . Эксперимент проводился следующим

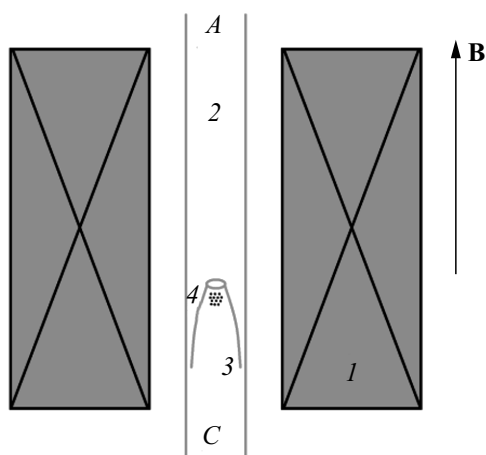


Рис. 1. Схематическое изображение пылевой ловушки. *I* — соленоид, *2* — разрядная трубка, *3* — вставка, сужающая разряд, *4* — пылевая структура. *A* — анод, *C* — катод.

образом. Зажигался разряд, в него инжектировались пылевые частицы, с помощью подсветки и видеосъемки визуализировались горизонтальные сечения структуры, далее прикладывалось магнитное поле выбранной величины и производилась видеозапись.

В магнитном поле изучаемая пылевая структура приходила во вращение, вектор ее угловой скорости направлен противоположно магнитной индукции. По видеоизображениям определялись позиции частиц в сечении, их угловые перемещения за время записи кадра и центр вращения. Далее из определенных данных находилась угловая скорость сечения при каждом из использованных значений магнитного поля. Полученная зависимость показана на рис. 2.

Обсуждая полученную зависимость, нужно отметить следующее. В выбранных условиях в используемой пылевой ловушке получено самое быстрое вращение пылевой плазмы в магнитном поле. Типичные значения для условий ВЧ-разряда — 10^2 rad/s [11], для стратифицированного тлеющего разряда — 1 rad/s [4,5]. Используемая пылевая ловушка при умеренном магнитном поле оказалась достаточно стабильной. Пылевая компонента в ней была удержана даже при

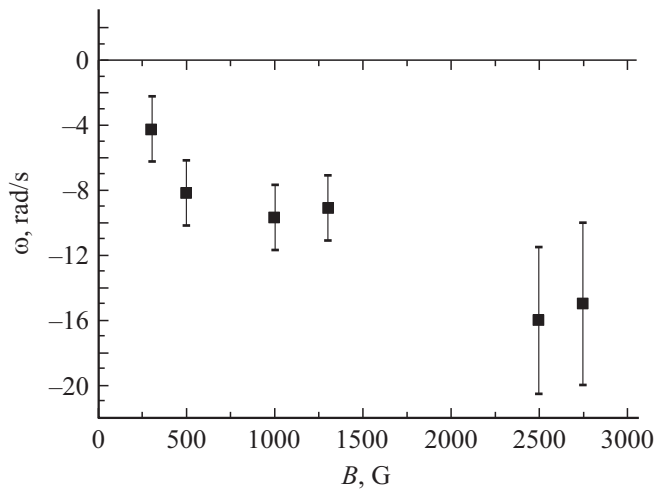


Рис. 2. Зависимость проекции угловой скорости вращения пылевых частиц от магнитного поля. Условия: Ne, $p = 0.4 \text{ Torr}$, $i = 1.3 \text{ mA}$, полидисперсные частицы кварца диаметром $1\text{--}2 \mu\text{m}$.

прохождении параметров, которые соответствуют токово-конвективной неустойчивости [12] в области $2000\text{--}3000 \text{ G}$, когда пылевая компонента в ловушке в страте частично теряется, а угловая скорость уменьшается в 3 раза [13]. В области малых магнитных полей до 400 G результаты хорошо согласуются с полученными в [9].

Говоря об интерпретации результата, можно отметить следующее. Вращение пылевой структуры связано с действием на нее интенсивного плазменного потока в данной области тлеющего разряда, в которой доминирует сила ионного увлечения [1,2]:

$$F_{id} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} a^2 n_i m_i v_{Ti} U_{i\phi} \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2\tau^2}{4} \Pi \right\}, \quad (1)$$

где a — радиус частицы, n_i — концентрация ионов, m_i — масса иона, v_{Ti} — тепловая скорость ионов, $\tau = T_e/T_i$, $z = \frac{z_d e^2}{a T_e}$ — безразмерный заряд, z_d — зарядовое число, Π — модифицированный кулоновский логарифм. Азимутальная скорость ионов $U_{i\phi}$ вызывается действием магнитного поля на радиальный поток $U_{i\phi} = \omega_i \tau_i U_{ir}$, $\omega_i \tau_i$ — произведение

циклотронной частоты на время между столкновениями. Тормозящим фактором служит сила трения Эпштейна [1,2]:

$$F_{fr} = \frac{8\sqrt{2\pi}}{3} a^2 p \frac{U_{d\phi}}{\vartheta_{Tn}}, \quad (2)$$

где $U_{d\phi}$ — скорость вращения ионов относительно газа, p — давление газа, ϑ_{Tn} — тепловая скорость атомов. В стационарном случае вращение пылевой частицы на радиусе r_d происходит с постоянной угловой скоростью, для которой можно дать приближенное уравнение с зависимостью от магнитной индукции

$$\omega = \frac{n_i m_i \vartheta_{Ti} (\omega_i \tau_i) U_{ir} \vartheta_{Tn} \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2 r^2}{4} \right\} \Pi}{p r_d}. \quad (3)$$

Численная оценка по формуле (3) при параметрах эксперимента $a = 1 \mu\text{m}$, $n_i = 5 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$ дает, например, в магнитном поле 3000 G значение 20 rad/s.

В заключение можно отметить, что в работе начато исследование пылевой плазмы в сильном магнитном поле в ловушке в двойном электрическом слое в области сужения тлеющего разряда. Получено устойчивое существование пылевой плазмы в используемых условиях, а также рекордно большая скорость ее вращения в магнитном поле. Показано, что доминирующей силой, действующей на пылевую структуру в данных условиях, является сила ионного увлечения.

Работа поддержана РФФ (грант № 18-12-00009).

Список литературы

- [1] Fortov V.E., Mofill G.E. Complex and dusty plasmas: from laboratory to space. N. Y.: Taylor & Francis Group, 2010. 440 p.
- [2] Tsytoich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M. Elementary physics of complex plasmas. N. Y.: Springer, 2008. 370 p.
- [3] Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И. Лабораторная пылевая плазма в магнитном поле. СПб.: Свое издательство, 2016. 136 с.
- [4] Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. N 6. P. 066403 (1–12).
- [5] Васильев М.М., Дьячков Л.Г., Антипов С.Н., Петров О.Ф., Фортвов В.Е. // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. В. 6. С. 414–419.

- [6] *Sato N.* // AIP Conf. Proc. 2002. V. 649. P. 66–73.
- [7] *Schwabe M., Konopka U., Bandyopadhyay P., Morfill G.E.* // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. N 21. P. 215004.
- [8] *Thomas E.Jr., Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., Rosenberg M.* // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. N 3. P. 030701 (1–4).
- [9] *Дзлiewa E.C., Карасев В.Ю., Павлов С.И.* // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 2. С. 142–149.
- [10] *Дзлiewa E.C., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 7. С. 51–55.
- [11] *Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V., Goree J., Steinberg V., Morfill G.E.* // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. N 2. P. 1890–1898.
- [12] *Недоспасов А.В.* // УФН. 1975. Т. 116. № 8. С. 643–644.
- [13] *Karasev V.Yu., Dzliewa E.S., Pavlov S.I., Novikov L.A., Maiorov S.A.* // IEEE Trans. Plasm. Sci. 2017. V. 44. N 4. P. 723–728.