

04;12

## Формирование структур из макрочастиц в плазме ВЧ разряда индукционного типа

© Ю.В. Герасимов, А.П. Нефедов, В.А. Синельщиков,  
В.Е. Фортов

Научно-исследовательский центр теплофизики  
импульсных воздействий РАН, Москва

Поступило в Редакцию 26 мая 1998 г.

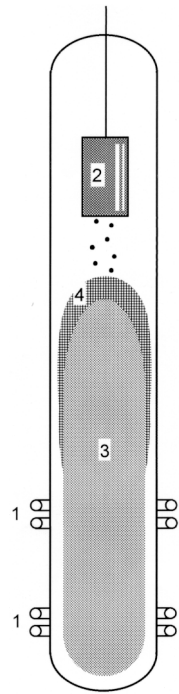
Экспериментально показана возможность левитации макрочастиц и формирования из них упорядоченных структур в плазме высокочастотного разряда индукционного типа. Эксперименты проводились в неоне при давлении 25–500 Па. Частота генератора составляла 100 МГц. Использовались частицы из меламинформальдегида размером  $1.87 \mu\text{m}$ .

В последние годы исследованиям пылевой плазмы, т.е. плазмы, содержащей макрочастицы, посвящено большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ [1,2]. Интерес к такого рода исследованиям связан с предсказанной теоретически [3] и в дальнейшем подтвержденной экспериментально возможностью образования упорядоченных структур различного типа вплоть до плазменного кристалла из макрочастиц, введенных в плазму. Формирование упорядоченных структур наблюдалось в плазме высокочастотного (ВЧ) емкостного разряда [4], в стратифицированном тлеющем разряде [5] и в термической плазме продуктов сгорания углеводородных топлив [6]. В плазме продуктов сгорания макрочастицы за счет термоэмиссии приобретали положительный заряд  $Z_p \sim 10^3$  элементарных зарядов. При температуре газа  $T_g = 1700 \text{ K}$ , концентрации частиц  $n_p = 5 \cdot 10^7 \text{ cm}^{-3}$  и концентрации электронов  $n_e \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  на измеренной бинарной корреляционной функции отчетливо наблюдался пик, свидетельствующий о ближнем порядке взаимодействия и характерный для жидкости. В разрядной плазме макрочастицы приобретают отрицательный заряд, определяемый плавающим потенциалом в данной точке пространства и размером макрочастицы. В разных экспериментах величина  $Z_p$  менялась в пределах  $10^4 - 10^6$  элементарных зарядов. Попадая в электростатическую ловушку в зависимости от условий, в первом приближении характеризуемых

величиной параметра неидеальности, макрочастицы группируются в ансамбль той или иной степени упорядоченности. При моделировании структур, образующихся из макрочастиц, необходимо принимать во внимание силу поля тяжести, взаимодействие частиц между собой и с внешним электрическим полем, а также взаимодействие частиц с нейтральной и ионной компонентами плазмы [7]. Зависание (левитация) макрочастиц и формирование из них ансамблей, обладающих различной степенью порядка, происходит в зоне разряда, характеризующейся существенной неоднородностью поперечной составляющей электрического поля и являющейся некоей электростатической ловушкой для заряженных макрочастиц. В случае ВЧ емкостного разряда такая ловушка образуется в приэлектродной области, в случае стратифицированного тлеющего разряда — в голове страты.

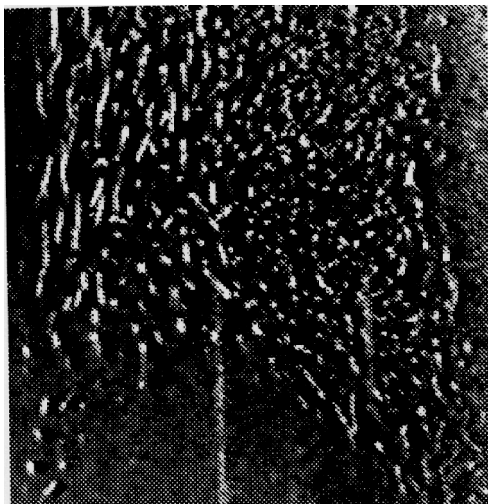
В настоящей работе впервые наблюдалось образование упорядоченных структур в плазме ВЧ индукционного разряда. В отличие от перечисленных выше типов разряда ВЧ индукционный разряд является разрядом безэлектродного типа. Это обстоятельство весьма привлекательно как с точки зрения ряда технологических приложений, так и с точки зрения проведения фундаментальных исследований, поскольку дает возможность получать и исследовать плазменные образования различной конфигурации и протяженности. В случае ВЧ индукционного разряда областью, в которой можно было ожидать левитации как отдельных заряженных макрочастиц, так и состоящих из них ансамблей, является область между однородной квазинейтральной плазмой и стенкой, ограничивающей плазменный объем, или нейтральным газом, окружающим ее.

Плазма генерировалась в вертикально расположенной стеклянной трубке диаметром 20 мм и длиной 20 см с помощью стандартного прибора ППБЛ-3, используемого для питания безэлектродных ламп, служащих источниками линейчатых спектров атомов различных металлов. Частота генератора составляла 100 МГц. Согласно оценкам средняя мощность, вкладываемая в индуктор, была около одного ватта и могла изменяться в несколько раз путем изменения величины тока через индуктор в пределах  $I = 60\text{--}200$  мА. Трубка помещалась в индуктор, состоящий из четырех витков, так что нижний ее торец располагался на несколько миллиметров ниже первого витка индуктора (см. рис. 1). В качестве рабочего газа использовался неон при давлении  $P$  от 25 до 500 Па. При включении генератора светящаяся плазменная область



**Рис. 1.** Схема экспериментальной трубки: 1 — витки индуктора, 2 — контейнер с частицами, 3 — светящийся плазменный объем, 4 — область с левитирующими частицами.

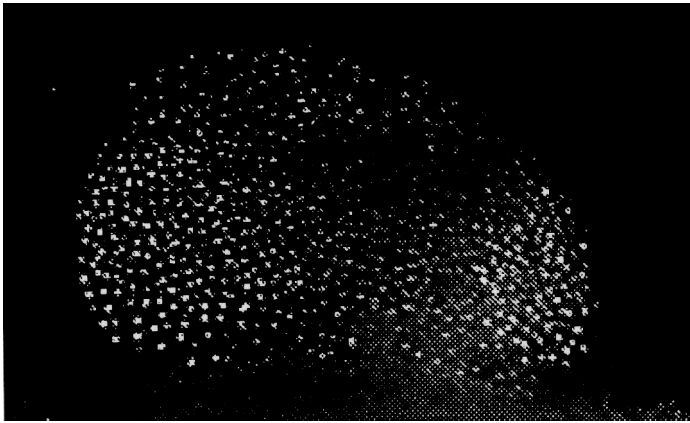
заполняла всю трубку в поперечном направлении. В вертикальном направлении размер плазменного образования зависел от давления газа и мощности генератора и мог изменяться от нескольких сантиметров до величины, равной размеру трубки в вертикальном направлении. Частицы вводились в плазменный объем путем встряхивания металлического контейнера, расположенного в верхней части трубки на расстоянии 70 mm от верхнего витка индуктора. Дно контейнера было сделано из мелкоячеистой металлической сетки. Использовались частицы из меламин формальдегида диаметром  $1.87 \pm 0.04 \mu\text{m}$ . Учитывая, что плотность материала равна  $1.5 \text{ g/cm}^3$ , вес одной частицы составлял  $4.1 \cdot 10^{-5} \mu\text{g}$ .



**Рис. 2.** Изображение вертикального сечения (размер  $8.4 \times 8.7$  mm) ансамбля частиц при  $I = 120$  mA и  $P = 63$  Pa.

Система наблюдения частиц была аналогична использовавшейся в [5]. Луч диодного лазера на длине волны 670 nm, имевший форму ножа с шириной 25 mm и толщиной в области перетяжки около 200  $\mu$ m, просвечивал исследуемый объем. При этом лазерный луч мог перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях, а его плоскость поворачиваться. Таким образом, можно было наблюдать различные сечения плазменного объема. Частицы наблюдались в рассеянном лазерном излучении с помощью ПЗС камеры, расположенной под углом около  $60^\circ$  к плоскости лазерного ножа, и регистрируемые изображения записывались на видеомагнитофон.

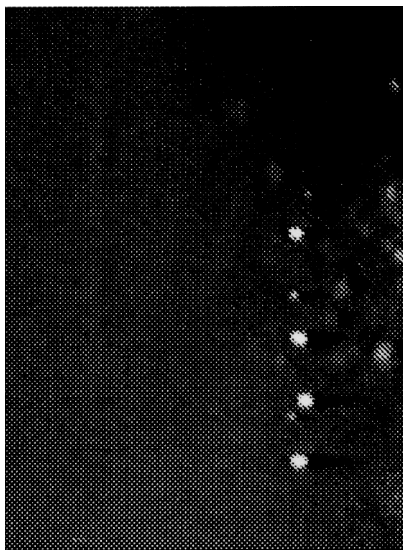
Зависание частиц наблюдалось как в пристеночной области, так и на верхней границе плазменного образования, т.е. в переходной области между однородно светящейся плазмой и нейтральным газом (см. рис. 1). На рис. 2 представлено изображение вертикального сечения ансамбля частиц, висящих над областью свечения, зарегистрированное при давлении 63 Pa и токе 120 mA. Видно, что отдельные частицы совершают колебания около положения равновесия и их изображение



**Рис. 3.** Изображение вертикального сечения (размер  $6.4 \times 3.9$  mm) ансамбля частиц при  $I = 200$  mA и  $P = 500$  Pa.

смазано. С ростом давления амплитуда и частота колебаний уменьшались. Однако во всех случаях, независимо от того, как вели себя частицы (совершали колебания или находились в неподвижном состоянии), область, в которой они зависали, была резко ограничена: сверху некоей границей, расположенной в нейтральном газе, а снизу — границей светящегося плазменного образования, которую можно отождествить с областью однородной квазинейтральной плазмы. Последнее обстоятельство отчетливо проявляется на рис. 2. Увеличение мощности генератора приводило к расширению объема, занятого плазмой, т.е. смещению в вертикальном направлении границы области свечения и соответственно смещению, как целого, области с частицами. Картина движения частиц при этом существенно не менялась.

При давлении порядка 500 Pa и токе генератора 200 mA в области между плазмой и дном металлического контейнера (характерное расстояние между ними при этом составляло порядка 2 cm) наблюдалась устойчивая структура, состоящая из большого числа частиц. Ее поперечное сечение в вертикальной плоскости приведено на рис. 3. Увеличение общего числа частиц (путем введения дополнительных частиц) приводило к увеличению размеров и изменению формы структуры



**Рис. 4.** Изображение четырех частиц, висящих в пристеночной области, при  $I = 150 \text{ mA}$  и  $P = 115 \text{ Pa}$ . Размер фрагмента  $3.6 \times 5.0 \text{ mm}$ .

в вертикальном направлении, а также появлению в нижней ее части направленных циркуляционных потоков частиц.

В пристеночной области наблюдались как отдельно висящие частицы, так и вертикальные цепочки из нескольких частиц, которые могли висеть сколь угодно долго. На рис. 4 представлено изображение четырех частиц, висящих в пристеночной области при давлении  $115 \text{ Pa}$  и токе генератора  $150 \text{ mA}$ . Расстояние между частицами составляло порядка  $700 \text{ }\mu\text{m}$ . Изменение мощности генератора не приводило к существенному изменению наблюдаемой картины до тех пор, пока к области наблюдения не приближалась верхняя граница плазменного объема.

Таким образом, впервые экспериментально показано, что в плазме индукционного ВЧ разряда можно получать упорядоченные структуры из макрочастиц. Формы и поведение ансамблей частиц весьма схожи с наблюдавшимися в стратифицированном тлеющем разряде постоянного тока.

В заключение авторы выражают благодарность В.И. Молоткову и В.М. Торчинскому за помощь при проведении экспериментов, а также А.М. Липаеву за помощь при обработке видеоизображений.

## Список литературы

- [1] *Цытович В.Н.* // УФН. 1997. Т. 167. С. 57.
- [2] *Нефедов А.П., Петров О.Ф., Фортков В.Е.* // УФН. 1997. Т. 167. С. 1216.
- [3] *Ikezi H.* // Phys. Fluids. 1986. V. 29. P. 1764.
- [4] *Thomas H., Morfill G.E., Demmel V.* et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 652.
- [5] *Липаев А.М., Молотков В.И., Нефедов А.П.* и др. // ЖЭТФ. 1997. Т. 112. С. 2030.
- [6] *Фортков В.Е., Нефедов А.П., Петров О.Ф.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63. С. 176.
- [7] *Nitter T.* // Plasma Sources Sci. Technol. 1996. V. 5. P. 93.