

03;04

## Экспериментальное изучение деградации частиц в комплексной плазме

© М.А. Ермоленко, Е.С. Дзлиева, В.Ю. Карасев, С.И. Павлов,  
В.А. Полищук, А.П. Горбенко

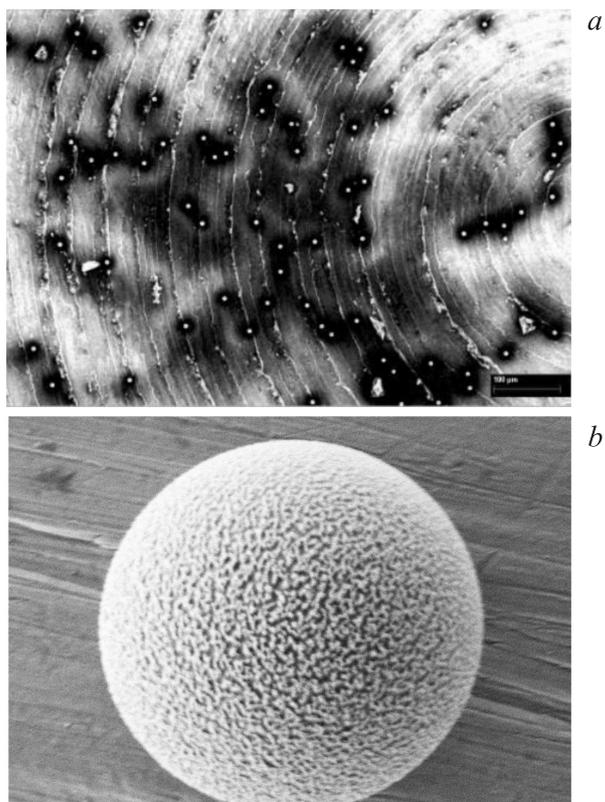
Институт физики Санкт-Петербургского государственного университета,  
Санкт-Петербург  
E-mail: plasmadust@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 июня 2015 г.

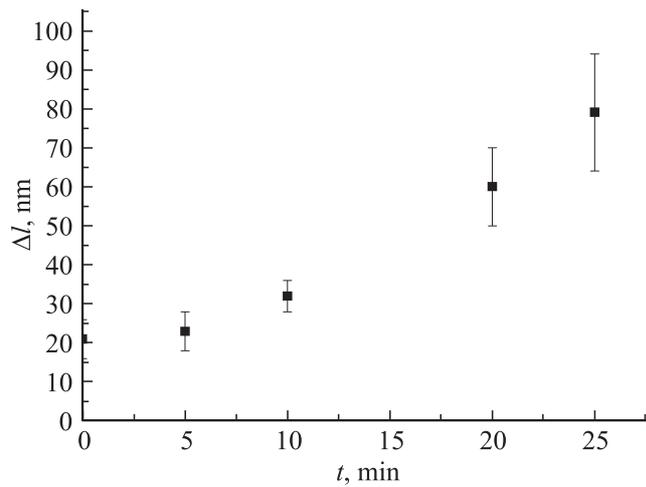
Исследуется изменение частиц меламин-формальдегида во время их нахождения в комплексной плазме. С помощью развитой методики извлечения частиц, непосредственно левитирующих в пылевой ловушке, получены образцы модифицированных плазмой частиц после воздействия плазмы в течение различного времени. Анализ собранных частиц проведен с помощью электронной микроскопии. Получены результаты изменения структуры поверхности частиц и количественные данные о деградации их размера в зависимости от времени нахождения в плазме.

Комплексная плазма представляет собой интенсивно развивающуюся междисциплинарную область исследования, в которой привлекательной стороной является возможность достаточно широкого круга приложений как самой плазмы, так и пылевых частиц [1,2]. В представленном сообщении речь идет об обработке полимерных пылевых частиц меламин-формальдегида (MF-R) во время нахождения в плазме. В химически активных газах производится синтез частиц [3], и имеется работа по плазменному травлению с оптической диагностикой размера [4], кроме того, имеются попытки изучения поверхности частиц в пылевой плазме, созданной в инертных газах [5,6]. Последнее стало возможным после того, как было показано [7], что извлекать пылевые частицы из плазменно-пылевой ловушки технически возможно.

Для эксперимента использовалась разрядная камера, позволяющая производить улавливание, сбор и извлечение пылевых частиц из тлеющего разряда из страт в вертикальном участке трубки, на установке, на которой ранее изучались условия отбора частиц по форме и размеру [7–9]. Применялись частицы из материала MF-R плотностью



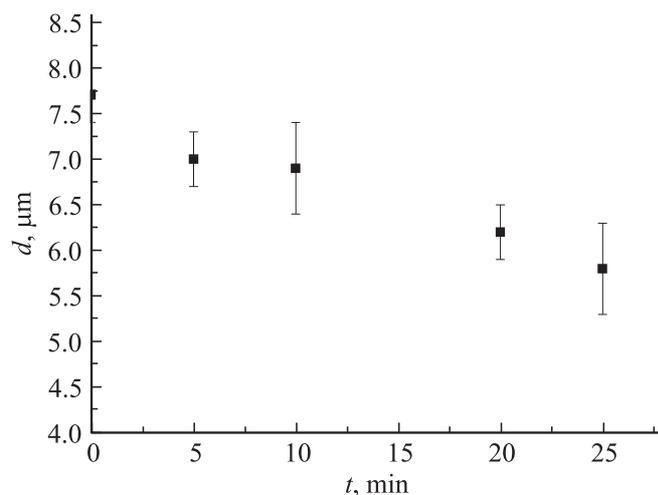
**Рис. 1.** Изображение сферических частиц, извлеченных из комплексной плазмы, полученное с помощью РСЭМ: *a* — собранные на подложку частицы меламин-формальдегида в одном эксперименте, показано изображение левой половины подложки. Горизонтальный размер изображения 0.8 mm. *b* — пример изображения одной модифицированной частицы после извлечения из комплексной плазмы, четко выражена развитая шероховатая структура поверхности. Горизонтальный размер изображения 10  $\mu\text{m}$ . Время нахождения частиц в плазме 20 min.



**Рис. 2.** Зависимость средней ширины дорожек  $\Delta l$  на поверхности частицы от времени нахождения в разряде. Условия описаны в тексте.

$1.5 \text{ g/cm}^3$  и размером в диаметре  $7.8 \mu\text{m}$ . При подобранных для левитации условиях: газ неон, ток разряда  $2.5 \text{ mA}$ , давление  $0.4 \text{ Torr}$  — создавались объемные плазменно-пылевые структуры в нескольких стратах. В этих условиях пылевая частица в плазме приобретает заряд порядка  $10^5$  элементарных и может левитировать в вертикальном электрическом поле пылевой ловушки. Далее, по прошествии выбранного времени снизу под страту подводилось собирающее устройство, на его поверхность собирались частицы, которые падали при выключении разряда. Для сбора использовалась подвижная каретка с управлением постоянным магнитом извне. На каретку устанавливалась платформа, на поверхность которой собирались частицы и которая затем встраивалась в столик камеры электронного микроскопа. В эксперименте на одну платформу собиралось порядка нескольких тысяч пылевых частиц (рис. 1, а).

Согласно описанной процедуре, были собраны образцы частиц с обработкой в плазме в течение 5, 10, 20 и 25 min и без обработки в плазме (исходные, находящиеся в контейнере после вакуумирования разрядной камеры). Далее, образцы передавались для последующей растровой



**Рис. 3.** Зависимость диаметра  $d$  пылевых частиц от времени нахождения в плазменно-пылевой ловушке. Условия описаны в тексте.

сканирующей электронной микроскопии РСЭМ в Merlin Zeiss. Пример деградированной поверхности частицы показан на рис. 1, *b*.

Первым обнаруженным эффектом оказалось уменьшение диаметра частиц за время нахождения в пылевой ловушке. Вторым результатом оказалось изменение структуры поверхности частиц. Развитый рельеф поверхности четко виден на рис. 1, *b*. Поверхность частицы изрезана „дорожками“. Длина дорожек и их взаимная ориентация на поверхности закономерностей не обнаружила. Но средняя ширина дорожек возрастает со временем нахождения частиц в плазме (рис. 2). На рис. 3 представлено изменение среднего диаметра частиц в зависимости от времени нахождения в плазме. Результаты показывают, что в условиях эксперимента за 25 min объем частиц уменьшился до 60%, а площадь поверхности до 45%. Частица теряет половину вещества, а деградация ее размера приводит к существенному изменению заряда частицы в течение эксперимента.

При сухом травлении образцов и обработке поверхности плазмой в технологических процессах используются ионы больших энергий.

В низкотемпературной плазме инертных газов тепловая энергия ионов порядка сотых eV, и вопрос, который возникает при обсуждении наших экспериментов, — как модифицируются пылевые частицы. Можно предположить, что ионы, идущие на поверхность частицы в процессе поддержания ее заряда, ускоряются ее полем. Для условий эксперимента заряд частицы порядка  $10^5$  элементарных, ее потенциал (плавающий потенциал) порядка 10 V. Достигающий поверхности частицы ион имеет энергию существенно выше тепловой, порядка 6 eV. Число приходящих на поверхность частицы ионов в единицу времени, согласно уравнению зарядки [1–3], порядка  $10^3$ . Это сообщает частице существенную энергию. Температура плавления меламин-формальдегида около 350°C. Оценка показывает, что по порядку величины за время наблюдения расплавленная доля массы частицы сопоставима с долей потери массы. Тогда причиной деградации частиц в низкотемпературной комплексной плазме будет ионный поток на частицу в процессе поддержания ее стационарного заряда.

Не делая из первых экспериментальных результатов строгих количественных выводов, можно заключить следующее:

— в продолжительных экспериментах с комплексной плазмой с применением „мягких“ частиц следует учитывать изменение заряда и массы частиц во время эксперимента и учитывать это при теоретических оценках;

— пылевая плазма может использоваться для обработки порошков, например развития пористости и шероховатости поверхности;

— пылевая плазма может быть прецизионным инструментом для изготовления частиц заданного размера, например калиброванных для оптической диагностики.

В работе впервые зарегистрирована деградация размера пылевых частиц во время нахождения в комплексной плазме, созданной без химически активных газов.

Работа поддержана РФФ, грант № 14-12-00094.

## Список литературы

- [1] Фортков В.Е., Петров О.Ф., Молотков В.И. // УФН. 2004. Т. 174. С. 495.
- [2] Tsytoich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M. Elementary Physics of complex plasmas. Berlin; N.Y.: Springer, 2008.

- [3] *Dusty Plasmas: Physics, Chemistry, and Technological Impact in Plasma Processing* / Ed. by A. Bouchoule. N.Y.: John Wiley & Sons, 1999. 408 p.
- [4] *Stoffels W.W., Stoffels E., Swinkels G.H.P.M., Boufnichel M., Kroesen G.M.W.* // *Phys. Rev. E.* 1999. V. 59. P. 2302.
- [5] *Жариков Н.Е.* и др. // *Ученые записки Петрозаводского гос. университета. Естественные и технические науки.* 2010. № 6(111). С. 99.
- [6] *Карасев В.Ю.* и др. // *Ученые записки Петрозаводского гос. университета. Естественные и технические науки.* 2014. № 8(145). Т. 2. С. 91.
- [7] *Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ivanov A.Yu., Éikhval'd A.I.* // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 79. P. 026406.
- [8] *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // *ЖТФ.* 2012. Т. 82. В. 7. С. 51.
- [9] *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // *Физ. плазм.* 2012. Т. 38. № 7. С. 591.