

## ОБ УПОРЯДОЧЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУРАХ, ФОРМИРУЕМЫХ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ

*В. Ю. Карасев\*, А. Ю. Иванов, Е. С. Дзалиева, А. И. Эйхвальд*

*Институт физики Санкт-Петербургского государственного университета  
198504, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 10 июля 2007 г.

В условиях стратифицированного тлеющего разряда созданы объемные пылевые структуры высокой степени упорядоченности и проанализированы их горизонтальные сечения. На основе рассчитанных корреляционных функций и локальных корреляционных параметров с соответствующими аппроксимациями проведена идентификация структурного состояния по двумерной теории КНТНУ и согласно феноменологическому подходу. Предложена ориентационная карта на основе ориентационного параметра, выделяющая домены в сечении структуры. Показано, что плазменный кристалл состоит из кристаллитов (гексагональных доменов), т. е. является поликристаллом. Наблюдалась зависимость расположения частиц от внешней формы пылевой структуры. Посредством термофоретического воздействия в периметре структуры созданы углы разной величины. Наблюдается изменение типа ячеек от гексагонального до квадратного.

PACS: 52.27.Lw

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевая (комплексная) плазма может служить моделью вещества в экстремальном состоянии [1, 2]. Сильная связь и корреляции наблюдаются в ее пылевой компоненте, если заряженные пылевые гранулы имеют электростатическую энергию взаимодействия, существенно превышающую тепловую. Лабораторная пылевая плазма создается в газоразрядной плазме в областях с большим электрическим полем, достаточным для удержания частиц в поле силы тяжести. Пылевые гранулы вбрасываются в разрядную камеру (или выращиваются в ней) и, находясь под плавающим потенциалом, приобретают отрицательный заряд порядка  $10^3$ – $10^5$  элементарных. Левитирующие частицы формируют упорядоченные структуры — плазменные кристаллы и плазменно-пылевую жидкость. Поскольку используемые пылинки имеют размеры 1–10 мкм и более, они эффективно рассеивают свет. Межчастичное расстояние обычно составляет доли миллиметра. Это позволяет в экспериментах регистрировать пылевые структуры с помощью метода визуализации. Сре-

ди приложений пылевой плазмы сегодня известны экология, энергетика, технологические процессы. Но основным приложением пока являются фундаментальные исследования: процессы самоорганизации, фазовые переходы, взаимодействие плазмы с веществом, нелинейные явления и др.

Одним из методов изучения пылевой плазмы является наложение разного рода внешних воздействий: тепловых [3], оптических [4, 5], ударных волн [6], постоянных и переменных электрических [7] и магнитных полей [8–10], а также одновременно нескольких воздействий разной природы [11, 12]. В литературе описаны исследования, в которых при внешних воздействиях изменялась форма пылевых структур в тлеющем разряде. Например, в работе [3] это наблюдалось при тепловом воздействии, в работе [13] — при уменьшении давления газа разряда.

Работы по детальному исследованию упорядоченности пылевых структур в тлеющем разряде ранее не проводились. Но плазменные кристаллы, созданные в данной работе, так же, как например, в работах [13–15] показывают возможность такого исследования. Кроме того, пылевые структуры, создаваемые в этих условиях, являются трехмерными.

\*E-mail: plasmadust@yandex.ru

В настоящей работе ставится задача изучения внутреннего расположения пылевых гранул в структуре. В качестве воздействия в экспериментах используются как внешние силы, так и изменение условий в тлеющем разряде постоянного тока. Работа продолжает начатое исследование: в [16] были созданы сложные образования, содержащие две и более отдельные структуры, в [17] представлено изменение формы и фазового состояния [18] при воздействии магнитного поля. Такая задача представляет интерес в связи с изучением фазовых переходов в пылевой плазме. Литературный анализ показывает, что сосуществование кристаллических фаз [19–22] может происходить в областях разрядных камер, где нарушается однородность условий разряда. Физические причины перехода от одной фазы к другой до сих пор однозначно не установлены [20].

Для анализа упорядоченности двумерных сечений кроме общепринятых методов в работе предлагается ориентационная карта, в которой каждой парной связи между частицами сопоставляется число, характеризующее ориентационный порядок этой связи.

## 2. СОЗДАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЙ УПОРЯДОЧЕННОСТИ

Использованная экспериментальная установка в общих чертах описана в работах [10, 14]. Для создания высокоупорядоченного плазменного кристалла в страте необходим стабильный разряд и монодисперсные порошки. При их использовании структура получается однородной, с минимумом дефектов. Кроме того, плазменный кристалл необходимо максимально охладить, например, уменьшая ток разряда, хотя при этом снижается заряд пылинок и меняется форма удерживающей ловушки в страте, т. е. форма структуры — структура сжимается в горизонтальном сечении. Нам удалось подобрать оптимальные условия, используя трубку диаметром 3 см, и плазмформирующий газ: смесь Ne с  $H_2$  в отношении 3:1. Созданный плазменный кристалл из частиц  $LiNbO_3$  плотностью  $4.6 \text{ г/см}^3$ , размером 1 мкм, при давлении 1.3 Торр и токе 0.9 мА показан на рис. 1а. Представленное горизонтальное сечение трехмерной структуры, содержит более 300 частиц, вся структура — более 6000.

Объемные пылевые структуры с не меньшим числом частиц в тлеющем разряде создавались и ранее, например, в работе [15]. Как правило, в больших по размеру структурах, в их нижней части возникают

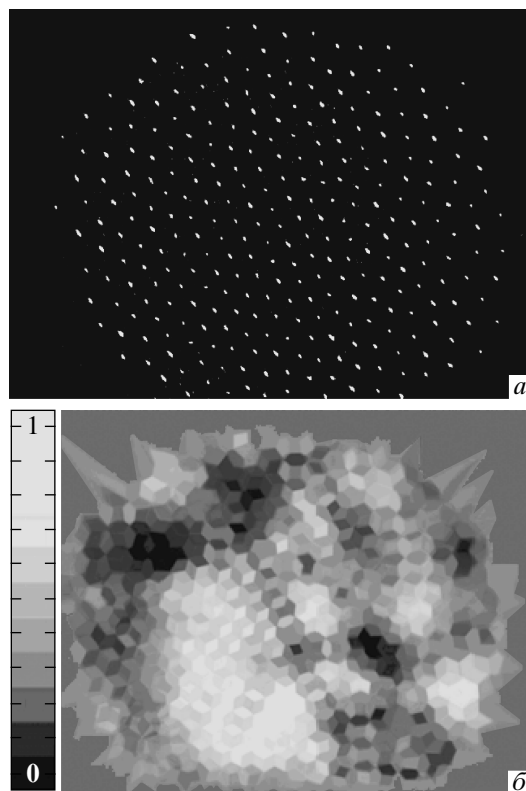
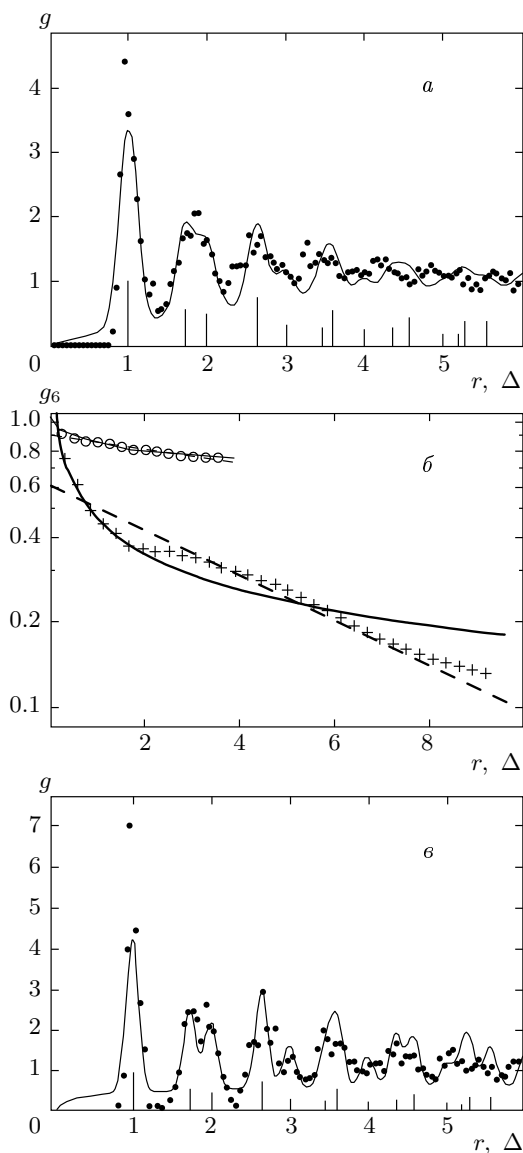


Рис. 1. а) Фотография горизонтального сечения пылевой структуры, проходящего через ее середину. Условия: частицы  $LiNbO_3$  размером 1 мкм, газ — смесь Ne с  $H_2$  в отношении 3 : 1,  $P = 1.3$  Торр,  $I = 0.9$  мА. Горизонтальный размер изображения 7.7 мм. б) Карта, построенная на основании локальной ориентационной функции  $g_6(0)$  для рис. 1а. Светлые участки — гексагональные домены структуры

колебательные неустойчивости [15]. Мы обнаружили, что существование последних приводит к ухудшению упорядоченности и в верхних слоях структуры. При приведенных выше условиях такие неустойчивости отсутствовали.

Порядок в структуре определялся по корреляционным функциям. На рис. 2 представлены трансляционная и ориентационная функции с соответствующими аппроксимациями [23, 24]. Межчастичное расстояние  $\Delta = 0.32 \pm 0.03$  мм. Параметр  $\xi/\Delta$  трехпараметрической аппроксимации для трансляционной функции равен  $1.9 \pm 0.2$ , параметры степенной и экспоненциальной аппроксимации для ориентационной функции:  $\eta = 0.43 \pm 0.02$ ,  $\xi_6/\Delta = 5.2 \pm 0.2$ . В данной работе мы рассматриваем только отдельные двумерные сечения. Поскольку  $\eta > 1/4$  и значение  $\xi$  соизмеримо с  $\xi_6$ , по двумерной теории КТНУ [24, 25]



**Рис. 2.** а) Корреляционная функция  $g(r)$ , построенная для структуры на рис. 1а. Точки — эксперимент, сплошная линия — трехпараметрическая аппроксимация, вертикальные штрихи — функция, построенная для идеальной гексагональной решетки.  $\Delta = 0.32$  мм. б) Ориентационная функция  $g_6(r)$  для структуры (+) и для домена (о). Сплошная линия — степенная аппроксимация, штриховая — экспоненциальная. в) Корреляционная функция  $g(r)$  для домена, трехпараметрическая аппроксимация со степенной огибающей

состояние структуры можно считать жидкостным.

В работе [18] было показано, что для пылевой плазмы, создаваемой в стратифицированном разряде, более информативным оказывается описание с

помощью локальных корреляционных функций и корреляционных параметров. Феноменологическое описание состояния и фазового перехода в этих терминах было предложено в работе [26]. Рассчитанные для рис. 1а локальные функции  $\Delta/\xi$  и  $g_6(0)$  соответственно равны 0.53 и 0.31. Согласно [26, 27], состояние структуры мы характеризуем как жидкость–лед.

Для представления об упорядоченности в двумерном сечении в данной работе предлагается рассматривать карту, построенную на основании локальной ориентационной функции  $g_6(0)$ , но без усреднения по сечению, см. рис. 1б. Такая карта удобна тем, что на ней наглядно выделены области (домены) с различной степенью ориентационного порядка. Градации оттенка от белого к черному соответствуют уменьшению гексагональной симметрии ячейки, т. е. величины  $g_6(0)$ .

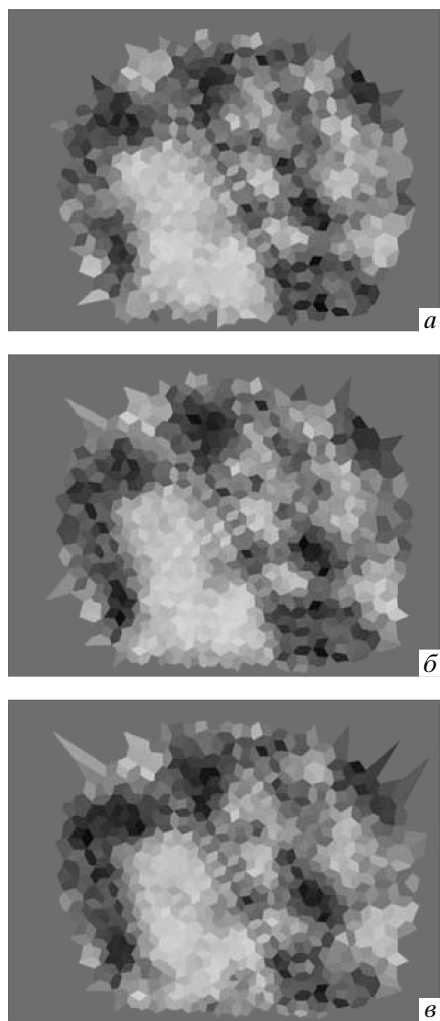
Карты, представленные на рис. 3, демонстрируют изменение упорядоченности структуры с течением времени. Из рисунка видно, что домены с относительно высоким значением функции  $g_6(0)$  сохраняют положение в структуре.

Можно предположить, что упорядоченность внутри одного домена будет служить оценкой предельно высокого порядка создаваемых структур. Построенные корреляционные функции для самого крупного домена рис. 1 приведены на рис. 2б (кривая 2) и 2в. Параметр  $\eta'$  степенной трехпараметрической аппроксимации функции  $g(r)$  равен 0.16, параметры для  $g_6(r) - \xi_6/\Delta = 18.6, \eta = 0.07$ . Это указывает на то, что состояние домена по теории КТНУ является кристаллическим. Согласно феноменологической классификации [26, 27], домен также является кристаллом.

Таким образом, плазменные кристаллы, создаваемые в тлеющем разряде, являются не менее привлекательными объектами при исследовании фазовых состояний и переходов, чем структуры, получаемые в условиях высокочастотного разряда. Вероятно, они представляют собой поликристаллы, состоящие из высокоупорядоченных кристаллитов.

### 3. ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ГРАНИЦЫ СТРУКТУРЫ

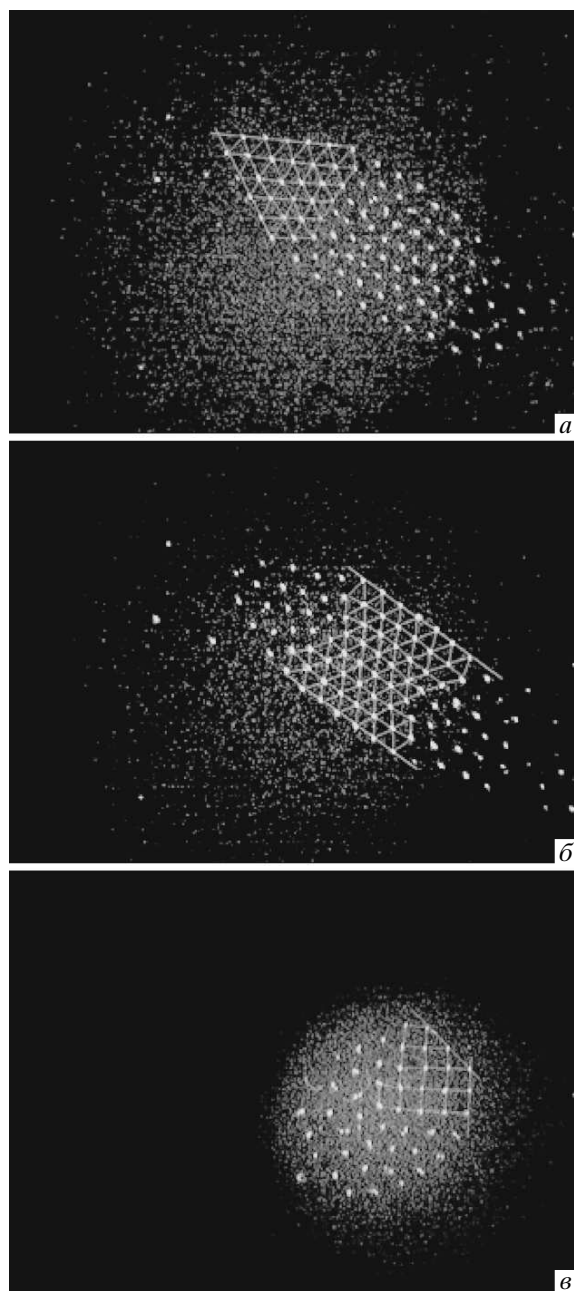
Анализ литературных работ [19–22] показывает, что доминирующим типом кристаллической решетки плазменно-пылевых структур является гексагональная, в том числе и в условиях стратифицированного разряда. Рассмотрим, как можно изменить



**Рис. 3.** Ориентационные карты, построенные с интервалами во времени 1 с, демонстрируют устойчивость доменов

расположение частиц в горизонтальных сечениях достаточно упорядоченных структур, формируемых в тлеющем разряде.

Предположив, что граница может оказывать влияние на расположение частиц, мы провели следующие опыты. С помощью небольших холодильников — цилиндров диаметром 2 см и высотой 6 см, находящихся при 0 °С, располагаемых напротив страты со структурой, изменялась форма внешней границы структуры. Варьируя число холодильников, их расположение и расстояние до стенки трубки посредством азимутально не симметричного термофоретического воздействия, можно создавать линейные границы, а также изменять величину угла между их элементами (в горизонтальном сечении).



**Рис. 4.** Управление расположением частиц посредством изменения формы границы структуры. С помощью термофоретического воздействия созданы элементы линейных границ, расположенных под углами 60° (а), 180° (б), 135° (в). На рис. а,б — гексагональный тип кристаллической решетки, на рис. в «квадратный» (в двумерном случае) тип. Условия соответствуют рис. 1а. Горизонтальный размер изображения 7.7 (а,б), 6.9 (в) мм

Рисунок 4а показывает структуру с линейными границами, расположенными под углом  $60^\circ$ , стимулирующим формирование гексагональных ячеек. Этот домен отмечен на рис. 4а посредством триангуляции. Далее, путем изменения расположения холодильников, в средней части структуры были созданы два угла, близких к  $180^\circ$  (две параллельные границы), рис. 4б. Между параллельными границами формируется устойчивое гексагональное расположение частиц.

Мы обнаружили, что создание только одного линейного элемента границы не приводит к формированию значительного по размеру домена, но при этом решетка формируется от самой границы (краевые нарушения отсутствуют). Можно предположить, что при формировании углов одна граница дает расположение частиц в линию, а вторая задает смещение следующего ряда вдоль этой линии (т. е. тип решетки). В таком случае можно создать квадратные ячейки, задавая угол  $90^\circ$  между линейными границами. Технически проще оказалось создавать углы  $45^\circ$  или  $135^\circ$ . На рис. 4в продемонстрировано формирование квадратных ячеек при создании угла, близкого к  $135^\circ$ , с помощью четырех холодильников. Заметим, что при углах между линейными границами, меньших  $30^\circ$ , не выгодных для формирования любого типа ячеек, в ближайшей к углу области упорядоченного расположения частиц не наблюдается.

Таким образом, с помощью управления формой границы пылевой структуры можно изменять расположение частиц, создавать структуры, лишенные обычно присутствующих краевых эффектов, нарушающих ориентационный порядок, и, возможно, менять тип кристаллической решетки.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях стратифицированного тлеющего разряда экспериментально получены пылевые структуры высокой упорядоченности. С помощью рассчитанных корреляционных функций с аппроксимацией и локальных ориентационных параметров исследован их структурный порядок. Предложено использование карты двумерных сечений на основе локальной ориентационной функции, выделяющей неоднородности в расположении частиц. Установлено, что в горизонтальных сечениях формируются стабильные домены с относительно высоким ориентационным порядком.

Рассмотрено влияние формы границы пылевой структуры на расположение частиц в двумерном сечении. Примененные манипуляции позволяют повышать порядок в расположении частиц и, вероятно, могут изменять тип решетки плазменного кристалла.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-02-00246). Один из авторов (К. В. Ю.) благодарит Министерство образования и науки РФ и Американский фонд гражданских исследований и развития CRDF за предоставление персональной стипендии в рамках проекта RUX0-000013-PZ-06.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Цытович, Г. Е. Морфилл, Х. Томас, *Физика плазмы* **28**, 675 (2002).
2. В. Е. Форттов, О. Ф. Петров, В. И. Молотков, *УФН* **174**, 495 (2004).
3. Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, Д. Н. Поляков и др., *ЖЭТФ* **127**, 1166 (2005).
4. V. E. Fortov, O. F. Petrov, V. I. Molotkov et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 205002 (2001).
5. K. Takahashi, T. Oishi, K. Shimonai et al., *Phys. Rev. E* **58**, 7805 (1998).
6. V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. I. Molotkov et al., *Phys. Rev. E* **71**, 036413 (2005).
7. D. Samsonov, A. V. Ivlev, G. E. Morfill et al., *Phys. Rev. E* **63**, 025401(R) (2001).
8. N. Sato, G. Uchida, T. Kaneko et al., *Phys. Plasmas* **8**, 1786 (2001).
9. U. Konopka, D. Samsonov, A. V. Ivlev et al., *Phys. Rev. E* **61**, 1890 (2000).
10. V. Yu. Karasev, E. S. Dzalieva, A. Yu. Ivanov et al., *Phys. Rev. E* **74**, 066403 (2006).
11. В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, Е. С. Дзалиева, *Опт. и спектр.* **100**, 503 (2006).
12. Е. С. Дзалиева, В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, *Опт. и спектр.* **97**, 107 (2004).
13. А. М. Липаев, В. И. Молотков, А. П. Нефедов и др., *ЖЭТФ* **112**, 2030 (1997).
14. Е. С. Дзалиева, В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, *Опт. и спектр.* **98**, 621 (2005).
15. В. И. Молотков, А. П. Нефедов, В. М. Торчинский и др., *ЖЭТФ* **116**, 902 (1999).

16. В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, Е. С. Дзлиева, Вестник СПбГУ, сер. 4, вып. 1 (2008).
17. В. Ю. Карасев, А. И. Эйхвальд, Е. С. Дзлиева, Вестник СПбГУ, сер. 4, вып. 2 (2008).
18. Е. С. Дзлиева, А. Ю. Иванов, В. Ю. Карасев и др., Опт. и спектр. **101**, 882 (2006).
19. J. H. Chu and I. Lin, Phys. Rev. Lett. **72**, 4009 (1994).
20. M. Zuzic, A. V. Ivlev, J. Goree et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 4064 (2000).
21. J. B. Pieper, G. Goree, and R. A. Quinn, Phys. Rev. E **54**, 5636 (1994).
22. Y. Hayashi, Phys. Rev. Lett. **83**, 4764 (1999).
23. D. G. Grier and Ch. A. Murray, J. Chem. Phys. **100**, 9088 (1994).
24. R. A. Quinn, C. Cui, J. Goree et al., Phys. Rev. E **53**, 2049(R) (1994).
25. D. R. Nelson, in *Phase Transitions and Critical Phenomena*, ed. by C. Domb and J. L. Leibowitz, Acad. Press, London (1983), Vol. 7, p. 1.
26. H. Thomas and G. E. Morfill, Nature **379**, 806 (1996).
27. G. E. Morfill, H. Thomas, U. Konopka et al., Phys. Plasmas **6**, 1769 (1999).