

О расслоении квазидвумерного плазменного кристалла

Р. А. Сыроватка, А. М. Липаев, В. Н. Наумкин и Б. А. Клумов

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва
125412, Россия

E-mail: syrovatkara@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

Аннотация. В данной экспериментальной работе представлена эволюция квазидвумерного плазменного кристалла в трех измерениях при неизменных параметрах разряда. Наблюдался процесс периодического плавления и последующей рекристаллизации, вызванный нарастанием вертикальных колебаний микрочастиц. Плавлению плазменного кристалла предшествовала структурная неустойчивость в центральной области, сопровождающаяся переходом к двухслойной решетке с квадратной симметрией. <https://doi.org/10.33849/2023202>

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевой или комплексной плазмой называют плазму, содержащую твердую дисперсную фазу. Интерес исследователей к пылевой плазме обусловлен ее широким распространением в природе. Так, межзвездные облака, газопылевые скопления, планетные кольца, атмосферы комет, пылевые структуры в верхних слоях атмосфер и ионосфер планет являются пылевой плазмой [1, 2]. В лабораторных условиях пылевая плазма может быть получена путем инъекции микрочастиц в газовый разряд низкого давления [3–5]. Заряд частиц в плазме определяется балансом потоков ионов и электронов на их поверхность и может достигать достаточно больших значений: $Z/e = 10^3\text{--}10^4$, где e — заряд электрона. Большой заряд микрочастиц часто приводит к тому, что формируется упорядоченная пылевая структура — так называемый плазменный кристалл.

Особый интерес в контексте физики двумерного плавления [6, 7], свойств двумерной жидкости [8] и расслоения двумерных систем [9] представляет квазидвумерный (q2D) плазменный кристалл, который формируется, например, в приэлектродной области высокочастотного (ВЧ) разряда при условии достаточно большой вертикальной составляющей градиента электрического потенциала. Такие плазменные кристаллы позволяют изучать явления, характерные для двумерных систем, такие как динамика дислокаций [10] и плавление, вызванное неустойчивостью связанных мод [11] на кинетическом уровне. Отследить траектории отдельных частиц в таких системах можно достаточно просто с помощью современных видеокамер. В большинстве работ по исследованию q2D систем изучались траектории частиц только в плоскости монослоя, а движение в вертикальном направлении не учитывалось. Однако, информация о вертикальном движении микрочастиц в таких системах является существенно важной для понимания их эволюции в процессе плавления или кристаллизации. Полную информацию о трехмерном движении микрочастиц можно получить при съемке пылевой системы несколькими камерами и последующей триангуляции трехмерных координат [12–14].

В настоящей работе экспериментально рассматривается процесс периодического плавления и кристаллизации q2D плазменного кристалла в трех измерениях, возникающий при неизменных параметрах газового разряда.

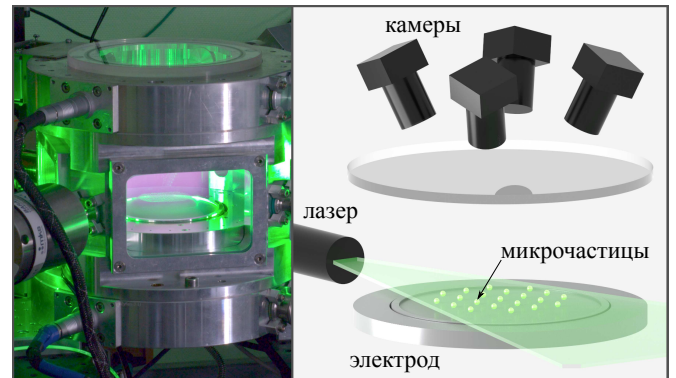


Рисунок 1. Фотография экспериментальной установки и принципиальная схема проведения эксперимента. Сферические полимерные частицы левитируют в приэлектродном слое емкостного разряда, создаваемом ВЧ-электродом, окруженным охранным кольцом. Разлет частиц в радиальном направлении предотвращается потенциальным барьером, формируемым тонким металлическим кольцом, расположенным по краю электрода. Четыре видеокамеры осуществляют синхронную съемку микрочастиц, подсвеченных плоским лазерным лучом шириной 5 см и толщиной около 1 мм в области перетяжки. Последующая обработка полученных изображений позволяет получить непрерывные трехмерные траектории пылевых частиц.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке, включающей в себя газоразрядную камеру низкого давления [12, 15] и систему оптической томографии пылевых частиц [12] (рисунок 1). В газоразрядной камере находился электрод в форме диска, окруженный заземленным охранным кольцом. Подача на электрод ВЧ-сигнала с частотой 13.56 МГц обеспечивала горение емкостного разряда, в приэлектродном слое которого левитировали частицы из меламинформальдегида (МФ) диаметром 7.17 мкм, инжестрированные с помощью электромагнитного диспенсера. При определенных параметрах разряда и достаточно малой концентрации микрочастиц формировался q2D плазменный кристалл в форме диска. Можно показать [16, 17], что в центре разрядной камеры в плоскости монослоя из микрочастиц, удерживающий потенциал $U(r)$ близок к параболическому ($U(r) \propto r^2$), а его аксиальная симметрия в этой плоскости, в частности, объясняет дископодобную форму двумерного плазменного кристалла. Тонким

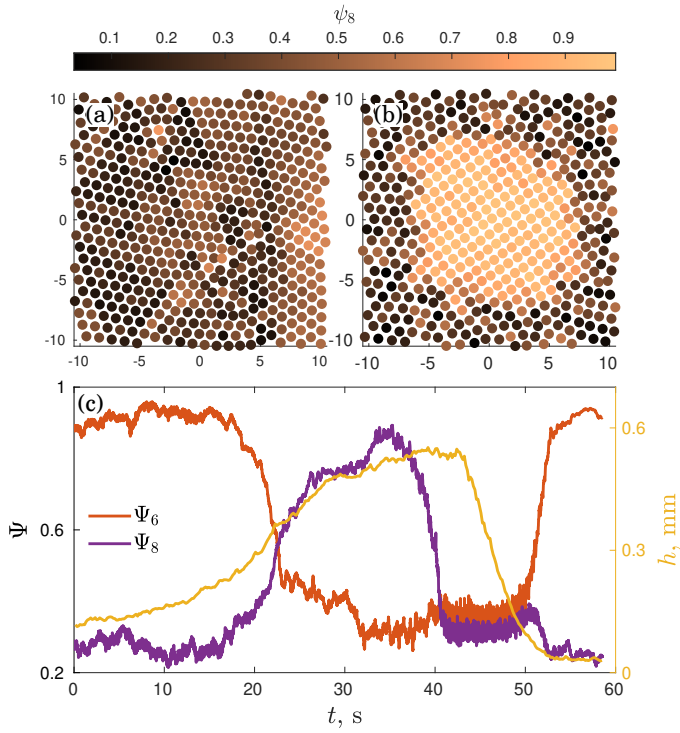


Рисунок 2. После инъекции и релаксации микрочастицы формировали q2D плазменный кристалл с треугольной симметрией в форме диска, фрагмент которого изображен на панели (a). Цвет соответствует величине параметра ψ_8 , который для гексагональной решетки ожидаемо мал. При неизменных параметрах разряда происходила раскачка вертикальных колебаний микрочастиц, при достижении достаточно большой амплитуды которых (около половины межчастичного расстояния), в центральной области плазменного кристалла возникала структурная неустойчивость с переходом к квадратной решетке (панель (b)), в то время как на периферии сохранялась треугольная симметрия. На панели (c) представлена динамика изменения параметров Ψ_6 и Ψ_8 . Возникновение структурной неустойчивости соответствует точке $t = 20$ с. Квадратная решетка сохранялась на протяжении примерно 20 с, после чего происходило разрушение плазменного кристалла, сопровождающееся хаотическим движением частиц (40–50 с) и диссипацией их кинетической энергии и последующей рекристаллизацией. Такой повторяющийся процесс носил квазипериодический характер и наблюдался на протяжении десятков минут.

металлическим кольцом, расположенным по краю электрода, формировался дополнительный потенциальный барьер, предотвращающий разлет частиц в радиальном направлении. Левитирующие микрочастицы подсвечивались плоским лазерным лучом шириной 5 см и толщиной около 1 мм в области перетяжки. Видеосъемка плазменного кристалла осуществлялась четырьмя видеокамерами через прозрачную верхнюю крышку разрядной камеры. Последовательная обработка полученных изображений, проведенная с использованием техники компьютерного стереозрения, позволяла получить непрерывные трехмерные траектории пылевых частиц в течение нескольких минут [12–14].

В данной работе мы представляем результаты экспериментов, в которых наблюдался квазипериодический процесс в q2D плазменном кристалле, сопровождающийся возникновением структурной неустойчивости

с переходом к двухслойной квадратной решетке, следующим за этим “плавлением” и последующей рекристаллизацией.

Для получения q2D плазменного кристалла производилась инъекция в емкостной разряд, горящий в аргоне при давлении $p \approx 1$ Па и напряжении на ВЧ-электроре $V_{pp} = 65$ В. После релаксации, занимающей порядка десяти секунд, микрочастицы формировали однослойную упорядоченную структуру с гексагональной решеткой (1 Δ), представленную на рисунке 2(a). Частицы вбрасывались небольшими порциями, пока их количество не достигало 700–800 штук. При указанных выше параметрах такое сравнительно небольшое количество частиц позволяло не допустить формирования многослойной структуры. После получения кристалла надлежащего качества, то есть не содержащего “спаренных” частиц, которые являются типичной проблемой в экспериментах с пылевой плазмой, мы начинали плавно понижать давление газа. При достижении давления около 0.6 Па (это значение могло варьироваться в пределах 0.05 Па от эксперимента к эксперименту) плазменный кристалл начинал испытывать нарастающие по амплитуде вертикальные колебания (желтая линия на рисунке 2(c)) вплоть до своего плавления, после которого частицы релаксировали и рекристаллизовывались. При этом непосредственно перед плавлением в центральной области плазменного кристалла возникала структурная неустойчивость с переходом к решетке с квадратной симметрией (2 $\square$). Мы оставим обсуждение механизма возникновения данных колебаний за пределами этой статьи, однако, очевидно, что именно они являются катализатором структурного перехода (1 Δ) $\rightarrow$ (2 $\square$) и причиной того, что такой переход не наблюдался ранее в экспериментах с q2D системами в ВЧ-разряде. На рисунке 2(b) представлена центральная область плазменного кристалла после перехода (1 Δ) $\rightarrow$ (2 $\square$); частицы раскрашены в соответствии с величиной локального ориентационного параметра порядка ψ_8 :

$$\psi_n = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n n e^{in\theta_l}, \quad (1)$$

где θ — угол между вектором, соединяющим частицу с ее соседом, и произвольно выбранным фиксированным направлением; суммирование производится по n ближайшим соседям. Значение ψ_8 близко к нулю для гексагональной решетки (рисунке 2(a)) и равно единице для идеальной квадратной решетки. Можно видеть, что область кристалла с квадратной симметрией имеет характерный размер в 15 межчастичных расстояний и расположена в центральной области, в то время как на периферии сохраняется треугольная симметрия. На рисунке 2(c), на котором приведена динамика изменения глобальных ориентационных параметров порядка Ψ_6 и Ψ_8 ($\Psi_n = \langle \psi_n \rangle$), такое состояние плазменного кристалла соответствует интервалу $t = 20$ –40 с. Амплитуда вертикальных колебаний частиц при этом достигает максимального значения, после чего пылевая структура утрачивает стабильность и разрушается. Накопленная частицами кинетическая энергия диссипирует ($t = 40$ –50 с) и система возвращается в свое первоначальное состояние кристалла с гексагональной

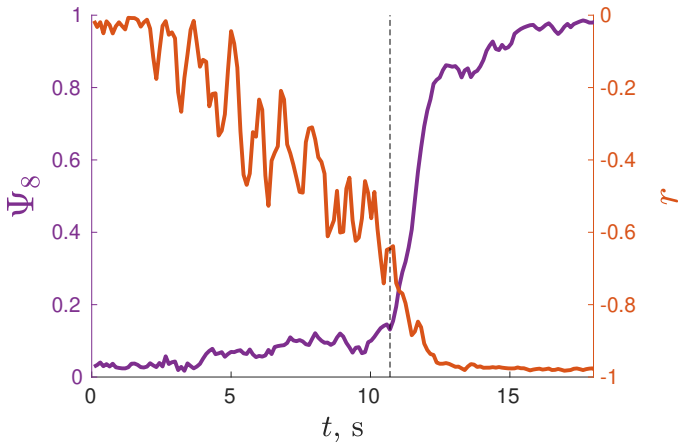


Рисунок 3. Синяя линия показывает зависимость параметра Ψ_8 от времени для группы частиц, находящихся в центральной области плазменного кристалла. В момент времени, обозначенный вертикальной пунктирной линией, начинает формироваться квадратная решетка. Красной линией показан линейный коэффициент корреляции вертикальных скоростей микрочастиц для групп частиц, формирующих два слоя квадратной решетки.

решеткой. Такие циклы плавления и кристаллизации носили квазипериодический характер и наблюдались на протяжении десятков минут.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Развитие вертикальных колебаний микрочастиц, наблюдаемое в нашем эксперименте, приводило к тому, что формировались две группы частиц, движущихся в противофазе и проходящие друг сквозь друга в середине траектории движения. Так в области решетки с квадратной симметрией частицы двигались строго в противофазе со своими четырьмя ближайшими соседями. Рассмотрев ретроспективно две группы частиц из области с квадратной симметрией, принадлежащих разным слоям, построим зависимость линейного коэффициента корреляции их вертикальных скоростей r [18, 19] (рисунок 3):

$$r_{\circ\circ} = \frac{\text{cov}(v_{z\circ}, v_{z\circ})}{\sigma_{v_{z\circ}} \sigma_{v_{z\circ}}}, \quad (2)$$

где $\circ$ и $\diamond$ обозначают группы частиц, формирующие два слоя квадратной решетки.

Как можно наблюдать на рисунке 3, переход к квадратной решетке осуществляется при $r = 0.6\text{--}0.7$. Такое значение коэффициента корреляции соответствует паттернам движения, представленным на панелях (a) и (b) рисунка 4. На панели (a) представлена гексагональная решетка из двух слоев микрочастиц, количество которых в одном из слоев в два раза больше, чем в другом (12Δ). На панели (b) изображена трехслойная гексагональная решетка (111Δ), в которой средний слой не испытывает выраженного вертикального движения, а крайние слои движутся в противофазе. Такие паттерны, а также переходные состояния между ними наблюдаются непосредственно перед переходом $\Delta \rightarrow \square$. Подобное расслоение плазменного кристалла (однако

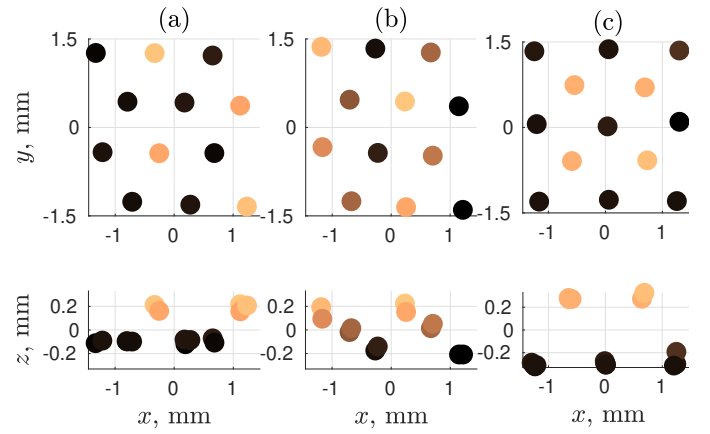


Рисунок 4. Конфигурации фрагмента плазменного кристалла в разные моменты времени. Темный цвет соответствует меньшей высоте микрочастиц. Из-за непрерывного увеличения амплитуды вертикальных колебаний, микрочастицы формируют энергетически более выгодные конфигурации: двухслойную гексагональную решетку (12Δ) с удвоенным количеством частиц в одном из слоев (панель (a)), трехслойную гексагональную решетку (111Δ) (панель (b)) и, наконец, двухслойную квадратную решетку ($2\square$), представленную на панели (c). В приведенных случаях темные частицы движутся вверх, в то время как светлые — вниз. На панели (b) микрочастицы в промежуточном слое не имеют выраженного движения в вертикальном направлении.

статическое, а не динамическое, как в нашем случае) предсказано в расчетно-теоретической работе [20], в которой плазменный кристалл в состоянии (1Δ) расслаивался при ослаблении силы, удерживающей микрочастицы в вертикальном направлении. В нашем же случае расслаивание вызвано нарастающими вертикальными колебаниями, которые в итоге приводят к формированию двухслойной квадратной решетки в центральной области кристалла, где плотность частиц выше и, таким образом, двухслойная конфигурация становится более энергетически эффективной.

В экспериментальных и теоретических работах [12, 20–22], в которых наблюдалась квадратная решетка в q2D пылевых структурах, имело место рассечение плазменного кристалла по вертикали, которое приводило к тому, что гексагональная решетка переставала быть наиболее энергетически выгодным состоянием системы. Авторы этих работ отмечают, переход к квадратной решетке осуществляется при $d/a = 0.4\text{--}0.5$, где d — расстояние между слоями, a — межчастичное расстояние. Что касается нашего эксперимента, то, если принять за расстояние между слоями удвоенную амплитуду колебаний микрочастиц, переход к квадратной решетке также происходит при $d/a \approx 0.5$ (см. рисунок 2(c); межчастичное расстояние составляло около 1 мм).

В настоящей работе мы представили эксперимент, в котором рассматривалась эволюция q2D плазменного кристалла в трех измерениях. Впервые наблюдалось периодическое плавление и кристаллизация q2D плазменного кристалла при неизменных параметрах разряда. Вследствие нарастающих вертикальных колебаний микрочастиц происходило расслоение структуры на группы частиц, движущихся в противофазе. Обнаружены паттерны расслоения, предсказанные в расчетно-

теоретических работах. При достижении амплитуды колебаний порядка четверти межчастичного расстояния в центральной области плазменного кристалла возникла структурная неустойчивость, сопровождающаяся переходом к более энергетически выгодной конфигурации с квадратной решеткой. Перекачка энергии между вертикальной и горизонтальными модами колебаний приводили затем к плавлению плазменного кристалла. После диссипации кинетической энергии микрочастиц происходила рекристаллизация и снова формировалась структура с треугольной симметрией.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Horányi M, Hartquist T W, Havnes O, Mendis D A and Morfill G E 2004 *Rev. Geophys.* **42** RG4002
2. Turco R P, Toon O B, Whitten R C, Keesee R G and Hollenbach D 1982 *Planet. Space Sci.* **30** 1147–1181
3. Thomas H, Morfill G E, Demmel V, Goree J, Feuerbacher B and Möhlmann D 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 652–655
4. Chu J H and Lin I 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 4009–4012
5. Melzer A, Trottenberg T and Piel A 1994 *Phys. Lett. A* **191** 301–308
6. Рыжов В Н, Тареева Е Е, Фомин Ю Д и Циок Е Н 2017 *УФН* **187** 921–951
7. Vasilieva E V, Petrov O F and Vasiliev M M 2021 *Sci. Rep.* **11** 523
8. Клумов Б А 2022 *Письма в ЖЭТФ* **116** 681–685
9. Oğuz E C, Reinmüller A, Schöpe H J, Palberg T, Messina R and Löwen H 2012 *J. Phys.: Condens. Matter* **24** 464123
10. Nosenko V, Zhdanov S and Morfill G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 025002
11. Ivlev A V, Nosenko V and Röcker T B 2015 *Contrib. Plasma Phys.* **55** 35–57
12. Syrovatka R A, Lipaev A M, Naumkin V N and Klumov B A 2022 *JETP Lett.* **116** 869–874
13. Hartley R and Zisserman A 2003 *Multiple View Geometry in Computer Vision* (Cambridge university press)
14. Melzer A, Himpel M, Killer C and Mulsow M 2016 *J. Plasma Phys.* **82** 615820102
15. Knappek C A, Konopka U, Mohr D P, Huber P, Lipaev A M and Thomas H M 2021 *Rev. Sci. Instrum.* **92** 103505
16. Liu B, Avinash K and Goree J 2004 *Phys. Rev. E* **69** 036410
17. Klumov B A 2019 *JETP Lett.* **110** 715–721
18. Лисин Е А, Ваулина О С и Петров О Ф 2017 *ЖЭТФ* **151** 791–796
19. Lisin E A, Vaulina O S and Petrov O F 2018 *Phys. Plasmas* **25** 013702
20. Zampetaki A V, Huang H, Du C R, Löwen H and Ivlev A V 2020 *Phys. Rev. E* **102** 043204
21. Huang H, Ivlev A V, Nosenko V, Lin Y F and Du C R 2019 *Phys. Plasmas* **26** 013702
22. Singh S, Bandyopadhyay P, Kumar K and Sen A 2022 *Phys. Rev. Lett.* **129** 115003