

УДК 533.9.082.5

ЛИДИЯ АНДРЕЕВНА ЛУИЗОВА

кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ
alim@karelia.ru

АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ ПИСКУНОВ

аспирант кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ
piskunov@plasma.karelia.ru

СЕРГЕЙ ФЕДОРОВИЧ ПОДРЯДЧИКОВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ
psf@ptz.ru

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ СОЛОВЬЕВ

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ
avsolov@plasma.karelia.ru

АНАТОЛИЙ ДИАМИДОВИЧ ХАХАЕВ

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета ПетрГУ
alim@karelia.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СПЕКТРОВ

Для исследования плазменно-пылевых структур предлагается использовать пространственные спектры их изображений, полученные путем быстрого преобразования Фурье. Преимущества метода доказаны модельным экспериментом и на примере анализа изображений пылевых структур в тлеющем разряде постоянного тока в инертных и молекулярных газах. Показано, что метод устойчив к шумам и позволяет выявить скрытую упорядоченность в структуре.

Ключевые слова: парная корреляционная функция, пространственный спектр, пылевая плазма, скрытая упорядоченность, тлеющий разряд, преобразование Фурье

Как показал ход исторического развития знаний о физике низкотемпературной плазмы, к концу XX века на передний край нерешенных проблем в этой области вышли проблемы комплексной плазмы [6]. Она отличается от «классической» существенной гетерогенностью состава, наличием в нем микро- и макрочастиц с различными физико-химическими характеристиками, а также спецификой пространственного распределения этих частиц по объему плазменной среды. В комплексной плазме в определенных условиях отмечены появление фуллеренов, углеродных нанотрубок, а также процессы самоорганизации «пылеобразных» масс, образующихся в результате взаимодействия исходного плазмообразующего газа с окружением или искусственно инжектируемых в него микро- или макрочастиц в локально ограниченные структуры с различной степенью упорядоченности упомянутых частиц в них («плазменные кристаллы»). Такая плазма часто встречается в космосе: в планетных коль-

цах, хвостах комет, межпланетных и межзвездных облаках. Она обнаружена вблизи искусственных спутников Земли и в пристеночной области термоядерных установок с магнитным удержанием, а также в плазменных реакторах, дугах, разрядах. Теоретические расчеты равновесных свойств такой плазмы показывают, что при определенных условиях сильное межчастичное взаимодействие приводит к возникновению упорядоченной структуры в расположении макроскопических частиц, аналогичной структурам в жидкости или твердом теле. Таким образом, теория комплексной плазмы кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники – это интенсивно развивающийся раздел фундаментальной физики.

Проверка и уточнение теоретических моделей комплексной плазмы требует информации как о параметрах плазмообразующей среды, так и о характеристиках плазменно-пылевых образований, формирующихся в этой среде: их фор-

ме, объеме, среднем расстоянии между частицами, степени и характере упорядоченности расположения частиц в структуре. Традиционно эта информация извлекается из изображения сечения пылевой структуры, зарегистрированного цифровой видеокамерой или фотоаппаратом при освещении структуры лазерным «ножом», толщина которого должна быть меньше среднего расстояния между частицами.

Информацию об объемном распределении частиц можно получить путем сканирования сечений перемещением ножа с помощью оптической системы и быстрой видеосъемки [6] или применяя методы томографии [1].

Обработка двумерного изображения позволяет оценить форму, объем структуры и среднее значение расстояния между ближайшими частицами. Оценка степени упорядоченности структуры, как правило, делается на основе вида гистограммы расстояний между частицами, аналога бинарной корреляционной функции [4].

Наличие ярко выраженных пиков на гистограмме считается свидетельством высокой упорядоченности структуры. Однако такая упорядоченность видна непосредственно на изображении. Интерес представляет выявление скрытой упорядоченности, которая может возникнуть, например, на стадии «плавления кристалла», когда сосуществуют фазы «жидкость» – «лед» [5], то есть упорядоченные фрагменты хаотически расположены и случайно ориентированы среди массы неупорядоченных частиц.

При этом на гистограмме также появляются локальные максимумы, но эти максимумы могут быть и результатом случайных флуктуаций числа частиц в определенной области изображения при хаотическом расположении частиц. Поэтому имеет смысл рассмотреть альтернативный метод анализа пылевой структуры, построение пространственного спектра изображения.

В кристаллографии информацию о структуре твердого тела часто извлекают из картины дифракции рентгеновских лучей на исследуемом образце. Учитывая характерные расстояния между частицами в структурах (порядка 10^{-2} см), можно ожидать, что, например, линза с фокусным расстоянием около 1 м позволит наблюдать дифракцию Фраунгофера на структуре в видимом свете. Идея использовать дифракцию на структуре в видимом свете была предложена еще в работе [2] и проиллюстрирована экспериментом на модели пылевой структуры. Однако широкого распространения метод не получил из-за очевидных технических трудностей при его применении к реальным плазменно-пылевым структурам. В частности, наблюдению реальной дифракционной картины препятствует ее малая интенсивность и искажающее влияние стенок разрядного объема, в котором существует пылевое облако. Поскольку дифракционная картина Фраунгофера – это квадрат модуля двумерного фурье-образа объекта, на котором происходит

дифракция, соответствующая информация гораздо проще может быть извлечена путем вычисления двумерного фурье-образа изображения структуры. На рис. 1 информативность фурье-образа изображения проиллюстрирована на модельных изображениях в сопоставлении с информативностью гистограмм расстояний.

Использованная программа обработки двумерных изображений [1] определяет число частиц в изображении, максимальное расстояние между частицами R_{\max} и строит гистограмму расстояний между частицами. На графиках, представленных на рис. 1, по оси ординат отложено G – число частиц, оказавшихся в кольце радиуса R толщиной $dR = R_{\max}/M$ (M – число каналов гистограммы), вокруг одной частицы, просуммированное по всем частицам, деленное на площадь этого кольца и нормированное на максимальное значение по всей структуре. При построении пространственных спектров изображений использовалось быстрое дискретное преобразование Фурье. Результаты представляются в виде изображения спектра, в котором значение, пропорциональное модулю фурье-образа, передается градиацией яркости соответствующего элемента изображения (пиксела).

Внешне изображения 3а и 4а кажутся совершенно неупорядоченными, однако пространственный спектр четко выявляет их структуру. Максимумы на рис. 3б выявляют наличие прямоугольных фрагментов, ориентированных по вертикальной и горизонтальной оси. Концентрические кольца на рис. 4б показывают, что упорядоченные элементы с определенной структурой имеют самые различные ориентации в пространстве. Видно, что если спектр выявляет наличие элементов упорядоченности, то по гистограммам ничего сказать нельзя: на них имеются пики и провалы примерно одинаковой высоты и глубины.

На рис. 2 представлены полученные в работе [1] изображения (а) и пространственные спектры (б) пылевых структур из полидисперсных частиц Al_2O_3 и цинка в тлеющем разряде постоянного тока в инертных и молекулярных газах при различных давлениях газа (P) и токах (I).

Из приведенных выше примеров видно, что при анализе реальных изображений пространственный спектр не только четко выявляет наличие «скрытой» упорядоченности, но и может указать на наличие периодичности по определенным направлениям (столбцы 1 и 2 на рис. 2) или указывает на отсутствие определенной ориентации упорядоченных фрагментов (столбец 4 на рис. 2). Этот факт, вообще говоря, требует специального внимания теории, так как в тлеющих разрядах существует явная анизотропия электрических полей, направленных вдоль оси разрядной трубки и по ее радиусу. Сравнение спектров, представленных на рис. 2 в столбцах 2 и 3, показывает, что увеличение разрядного тока ведет к исчезновению всякой упорядоченности в структурах.

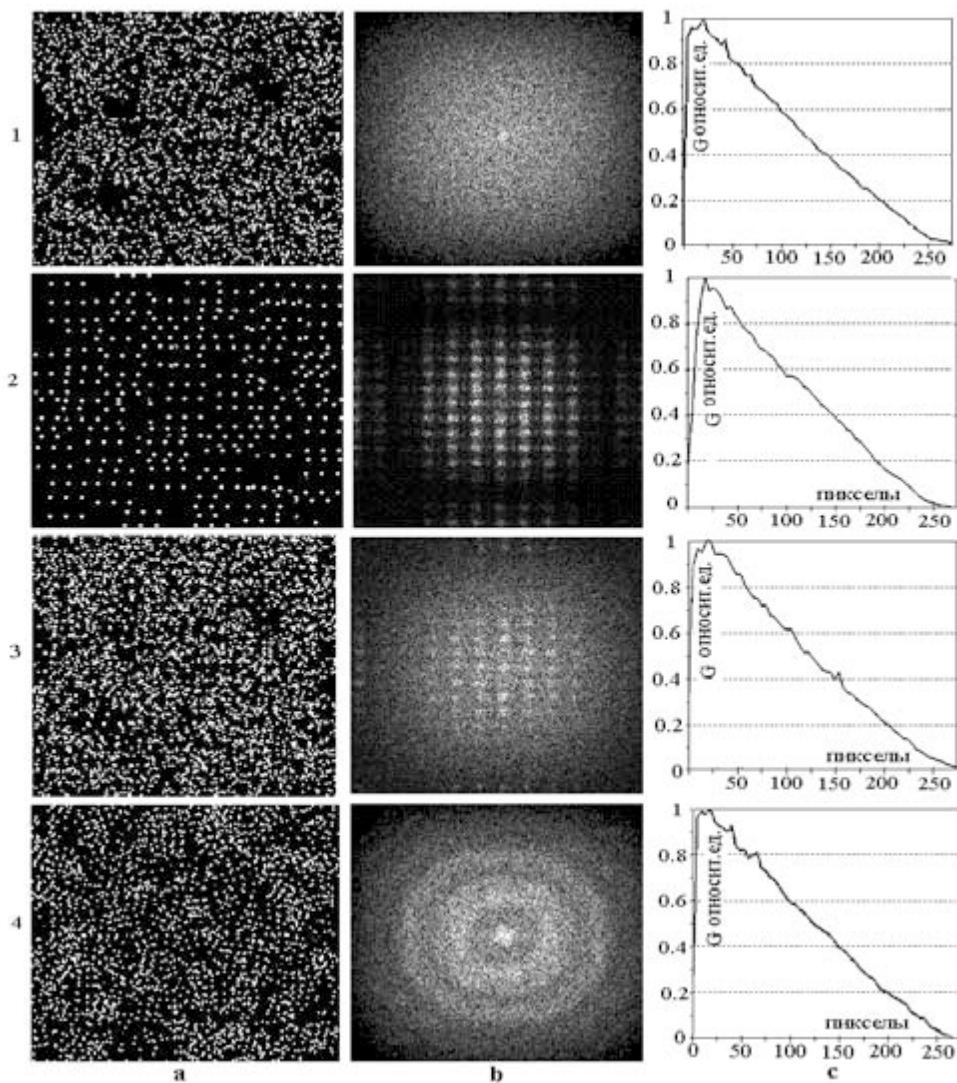


Рис. 1. Смоделированные изображения (а), соответствующие пространственные спектры (б) и гистограммы межчастичных расстояний (с). 1 – Неупорядоченная структура. 2 – Структура, полученная случайными сдвигами по вертикали и горизонтали квадрата, образованного девятью равноотстоящими точками. 3 – Наложение неупорядоченной структуры, представленной в ряду 2. 4 Наложение неупорядоченной структуры и структуры, полученной случайными сдвигами и поворотами квадрата, образованного девятью равноотстоящими точками

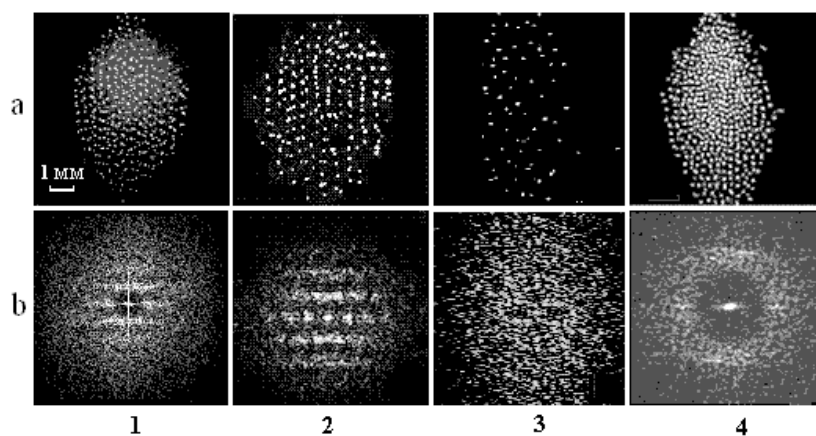


Рис. 2. Изображения структур (а) и пространственные спектры (б). 1 – Полидисперсный порошок цинка (2–6 мкм) в разряде в азоте при $P = 53$ Па, $I = 0.5$ мА. 2 – Полидисперсный порошок Al_2O_3 (1–60 мкм) в разряде в аргоне при $P = 80$ Па, $I = 0.6$ мА. 3 – Al_2O_3 в разряде в аргоне при $P = 80$ Па, $I = 2$ мА. 4 – Al_2O_3 в разряде в неоне при $P = 80$ Па, $I = 0.3$ мА.

На рисунке 3а представлено горизонтальное сечение структуры из частиц LiNbO_3 размером 1 мкм в тлеющем разряде в смеси гелия и неона [3]. Чтобы доказать, что типы упорядочения структуры различны в разных ее частях, авторы работы [3] вычисляют для

этих частей локальную ориентационную функцию. Мы выделили на изображении структуры две части и представили пространственный спектр части 1 на рисунке 3б и части 2 – на рисунке 3с. Разница типов упорядоченности очевидна.

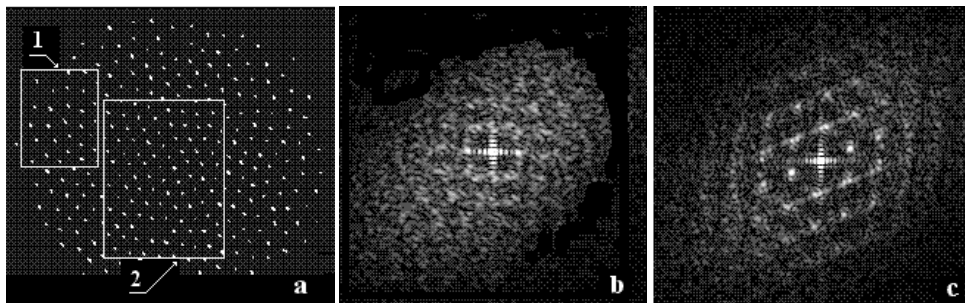


Рис. 3. а – изображение горизонтального сечения структуры из частиц LiNbO_3 из работы [3], б – пространственный спектр части изображения 1, с – пространственный спектр части 2.

Высокая скорость вычисления пространственных спектров изображений с использованием быстрого преобразования Фурье позволяет следить за эволюцией структуры в реальном времени при изменении условий разряда. Кроме того, немаловажным аспектом любого алгоритма является его устойчивость к шумам. Незначительная расфокусировка изображения (пока изображения отдельных частиц не сливаются) не влияет на положение максимумов пространственного спектра; присутствие в ис-

ходном изображении одиночных артефактов или бликов отражается только на величине и форме центрального максимума, который не несет полезной информации. Поэтому метод в принципе не требует предварительной обработки (например, бинаризации) изображений, получаемых фото- или видеокамерой.

Работа выполнена при поддержке гранта RUX0-000013-PZ-06, Министерства образования РФ и Правительства Карелии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бульба А. В., Луизова Л. А., Подрядчиков С. Ф., Хахаев А. Д., Щербина А. И. Самоорганизация и рост пылевых структур в тлеющем разряде // *Химия высоких энергий*. 2006. Т. 40. № 2. С. 155–160.
2. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Таранин М. В. Дифракция оптического излучения и анализ упорядоченных структур макрочастиц в неидеальной термической плазме // *Физика плазмы*. 1999. Т. 25. № 4. С. 311–314.
3. Карасев В. Ю., Иванов А. Ю., Дзиева Е. С., Эйхвальд А. И. Об упорядоченных пылевых структурах, формируемых в тлеющем разряде // *ЖЭТФ*. 2008. Т. 133. № 2. С. 460–465.
4. Нефедов А. П., Петров О. Ф., Фортвов В. Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием микрочастиц // *УФН*. 1997. Т. 167. № 11. С. 1215–1226.
5. Томас Х., Морфилл Г. Е., Цытович В. Н. Комплексная плазма: III. Эксперименты по сильной связи и дальним корреляциям // *Физика плазмы*. 2003. Т. 29. № 11. С. 963–1030.
6. Fortov V. E., Ivlev A. V., Khrapak S. A., Khrapak A. G., Morfil G. E. Complex (dusty) plasmas: current status, open issues, perspectives // *Physics Reports*. 2005. Vol. 421. P. 1–103.