

ВИКТОР ЮРЬЕВИЧ КАРАСЕВ

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики 1 физического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
plasmadust@yandex.ru

АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ ШТЫКОВ

преподаватель кафедры информационно-измерительных систем и физической электроники физико-технического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
shtykoff@gmail.com

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ*

Показано, что метод корреляционной спектроскопии может быть применен для изучения кинетических процессов в плазменно-пылевых структурах и расчета коэффициентов самодиффузии. Проведенные эксперименты по набору статистически достоверных данных приводят к заключению, что метод корреляционной спектроскопии является эффективным для оценки фазового состояния комплексной плазмы и для определения скорости протекания процессов фазовых переходов и установления границ их существования.

Ключевые слова: корреляционная спектроскопия, плазменно-пылевые структуры, коэффициент самодиффузии, динамика фазовых переходов

ВВЕДЕНИЕ

Наличие пылевых частиц в плазме может существенно влиять на химический и зарядовый состав, электрофизические и оптические свойства, а также на процессы теплообмена и массопереноса. Пылевые частицы в плазме заряжаются потоками электронов и ионов, путем термо-, фото- и вторичной эмиссии электронов. Заряженные частицы взаимодействуют как между собой, так и с внешними электрическими и магнитными полями. Основным источником диссипации кинетической энергии частиц является столкновение с нейтральными атомами плазмообразующего газа. Комбинированное воздействие на плазменно-пылевые структуры (ППС) внешних сил, сил межчастичного взаимодействия и процессов диссипации приводит как к формированию квазистационарных структур (кристаллическая фаза), так и сложных колебательных и даже хаотических систем (жидкая или газообразная фаза).

ППС могут проявлять свойства кристаллических структур, жидкостей и газоподобных субстанций. Описание протекания процессов фазовых переходов в плазменно-пылевых структурах является важной задачей, решаемой в рамках изучения динамических и кинетических процессов. Так, в работах [10], [11] представлен процесс «плавления» плазменно-пылевых структур при уменьшении давления разряда, в работе [8] впервые было показано изменение фазовых состояний ППС при изменении мощности генерации ВЧ-разряда, а процессы фазовых переходов

ППС, сформированных в тлеющем разряде, впервые были описаны в работе [9]. Исследования, проводимые с целью изучения кинетических характеристик плазменно-пылевых структур, а также отработка методик их измерения и расчета актуальны.

В настоящей работе исследуются процессы самодиффузии, происходящие в ППС, сформированных в тлеющем разряде. Диффузия в классическом понимании как процесс присутствует во всех фазовых состояниях вещества и характеризуется процессом взаимного проникновения одного типа вещества в структуру другого, в результате чего происходит выравнивание их концентраций по всему занимаемому объему. В случае исследования ППС процесс диффузии протекает внутри системы «пылевые частицы – плазмообразующий газ», при этом не происходит проникновения одного типа вещества в другое, а только изменение координат частиц, составляющих ППС, внутри структуры в течение всего времени существования ППС. В этом случае процесс можно определить как самодиффузию – частный случай диффузии, при котором диффундируют собственные частицы вещества. При этом частицы, участвующие в диффузионном движении, обладают одинаковыми химическими свойствами, но могут различаться по своим физическим характеристикам: иметь разные размеры, заряд и др.

Изучение самодиффузии играет важную роль при определении фазового состояния ППС, изучения характеристик процессов массопереноса

в ППС. Процесс самодиффузии характеризуется коэффициентом самодиффузии D , который отражает качественные изменения динамического состояния системы и характеризует стабильность ППС. При изучении кинетических процессов важно знать поведение частиц структуры, их колебательные характеристики. Вследствие большой заинтересованности в описании процессов фазовых переходов, знание коэффициента самодиффузии как одного из параметров упорядоченности структуры и одновременно величины, характеризующей колебания частиц, дает возможность исследовать процессы, происходящие в структурах на кинетическом уровне.

В работе [5] изучены причины вызывающих самодиффузию пылевых частиц в ППС и показано, что данный процесс отличен от диффузии в газах, жидкостях и твердых телах. В случае ППС диффузия представляет из себя беспорядочное движение заряженных пылевых частиц вследствие флуктуаций заряда частиц во времени. То есть именно из-за изменения поля заряженной частицы вследствие флуктуации заряда и изменения внешних параметров, а также из-за взаимодействия частиц в структуре возникает самодиффузия частиц. При переходе от кристаллического состояния структуры к жидкому и далее газообразному движению частиц становятся все более интенсивными, поэтому величина коэффициента самодиффузии однозначно связана с агрегатным состоянием ППС.

Теоретические расчеты коэффициента самодиффузии для систем «пылевые частицы – плазмообразующий газ» приведены в работах [1], [2], [3], [6]. Указанные работы посвящены исследованию связи транспортных характеристик пылевой подсистемы, в них описаны связи корреляционных функций и коэффициентов самодиффузии пылевых частиц, полученных экспериментально, с параметром неидеальности Γ и параметром масштабирования ξ . Самодиффузия микрочастиц является основным средством массопереноса, который определяет энергетические потери в пылевых системах и их энергетические характеристики [1]. В работах [2], [3] описывается массоперенос в пылевой плазме посредством самодиффузии макрочастиц, при этом величина коэффициента самодиффузии отражает качественные изменения динамического состояния системы. В работе [2] представлены результаты численного моделирования процессов массопереноса.

Значение коэффициентов самодиффузии для диссипативных систем представляет интерес не только с точки зрения определения динамических характеристик пылевой плазмы, но и для анализа различных кинетических процессов в молекулярной биологии, медицине, химии полимеров и т. д. [1].

ППС не всегда являются однородными по своему фазовому состоянию. В ряде случаев система включает в себя как кристаллическую фазу, так и жидкую фазу с возможностью перехода в газообразное состояние. На рис. 1 представлены фотографии как однородных кристаллических (а), так и неоднородных (б) и (в) по своему фазовому состоянию ППС.

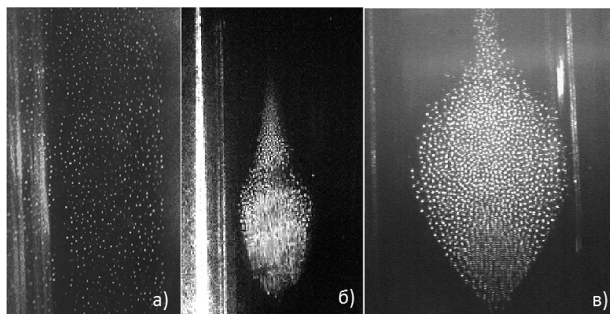


Рис. 1. Пример квазистационарной структуры, полученной при условиях: газ – Ar, материал частиц – MF, радиус 3,38 мкм, $P = 25$ Па, $I = 2$ мА (а), структуры с хаотическими колебаниями, полученной при условиях: газ – He, материал частиц – Al_2O_3 , $P = 40$ Па, $I = 0,6$ мА (б), и двухкомпонентной ППС, содержащей как кристаллическую фазу (верхняя часть), так и жидкую фазу (нижняя часть), полученной при условиях: газ – Ar, материал частиц – Al_2O_3 , ток разряда – 0,6 мА, давление плазмообразующего газа – 60 Па (в)

Объектом нашего исследования являются упорядоченные плазменно-пылевые структуры в плазме инертных газов, которые создаются путем инжектирования частиц вещества в плазменный разряд. Основным методом является метод фотонной корреляционной спектроскопии, который в литературе называется также методом динамического рассеяния света. С помощью этого метода определены значения коэффициентов самодиффузии и получены данные о динамике неоднородных по фазовым состояниям ППС.

МЕТОД КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Корреляционная спектроскопия наиболее часто применима для изучения жидкостных дисперсных систем с наличием частиц или других неоднородностей для проведения исследований в медицине и биологии. Использование метода фотонной корреляционной спектроскопии возможно для изучения процессов самодиффузии упорядоченных плазменно-пылевых структур и определения их транспортных характеристик. В литературе описано применение метода для определения коэффициента самодиффузии макрочастиц в термической плазме, плазме ВЧ-разряда, при этом метод не был применим для оценок процессов самодиффузии в системах, сформированных в тлеющем разряде.

В рамках эксперимента на основании непрерывного измерения рассеянного на ППС излучения лазера измерена корреляционная функция интенсивности:

$$g_2(\tau) = \overline{I_1(t)I_2(t+\tau)} = f(t)f^*(t)f(t+\tau)f^*(t+\tau), \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – значения интенсивности сигнала в различные моменты времени.

В случае рассмотрения движения частицы в вязкой среде зависимость между корреляционной функцией интенсивности и коэффициентом самодиффузии рассматриваемого объекта определяется следующим образом:

$$\gamma(\tau) = e^{-q^2 D \tau}, \quad \text{где } q = 2k \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2)$$

где k – волновой вектор ($2\pi/\lambda$); θ – угол рассеяния.

Экспериментально полученная корреляционная функция позволяет оценить значение коэффициента самодиффузии на основании выражения (2). Набор численных значений (точки функции) аппроксимируется с помощью (2), нормированной в соответствии с выражением (3).

$$g_2(\tau) = \frac{g_2(\tau) - g_2(\infty)}{g_2(0) - g_2(\infty)}. \quad (3)$$

Для получения и обработки корреляционных кривых использовалась программа, позволяющая снимать данные с платы-коррелятора в режиме реального времени, сохранять, обрабатывать данные и представлять корреляционные функции в графическом виде. Получив корреляционную функцию из эксперимента на основании выражения (2), оценивали значение коэффициента самодиффузии D . Оценка D производилась путем аппроксимации экспериментально полученного набора точек с помощью экспоненты (2). Производился подбор параметра показателя экспоненты до наилучшего совпадения с экспериментом в соответствии с критерием наименьших квадратов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения эксперимента была использована установка «Плазменный кристалл». Подробное описание установки приведено в работе [7]. К установке был присоединен корреляционный измерительный блок. Стеклопаяная разрядная трубка, в которой индуцировалась плазма тлеющего разряда и формировалась ППС, откачивалась до давления 10^{-5} Па и заполнялась рабочим газом. Для вброса частиц во время эксперимента применялся контейнер с частицами. После включения высоковольтного источника тока разрядный ток в трубке задавался набором сопротивлений. Визуализация пылевой структуры осуществлялась полупроводниковым лазером DTL-316 и набором линз, формирующих «лазерный нож», в рассеянном свете которого возможно наблюдение ППС. В состав программно-аппаратного комплекса для получения корреляционных функций входили: фотоэлектронный умножитель, который использовался в качестве детектора рассеянного на ППС излучения, плата кор-

релятора и программное обеспечение «PhotoCor», реализующее получение данных в режиме реального времени, сохранение и обработку данных.

Эксперимент проводился следующим образом: в объем трубки напускался рабочий газ в диапазоне давлений от 20 до 120 Па. Были использованы следующие газы: аргон, неон и гелий. После генерации разряда устанавливалось значение тока разряда в диапазоне от 0,2 до 4 мА. В область плазменного разряда производилось инжектирование пылевых частиц (оксид алюминия, цинк, оксид железа или другой поли- или монодисперсный порошок), после чего выдерживалось время для стабилизации параметров ППС. Далее настраивали лазер для визуализации ППС и регистрировали корреляционную функцию в течение одной минуты. Сохранив экспериментальные данные корреляционных кривых, производили изменение значения токовых характеристик с шагом 0,1 мА, после чего эксперимент повторялся. После проведения серии измерений в заданном диапазоне токов откачивали рабочий объем трубки и заполняли газом с новым значением давления. В случае смены рабочего газа производилась замена баллона и тренировки вакуумной системы с дальнейшим подбором параметров генерации ППС. В случае замены частиц производилось развакуумирование установки, чистка контейнера, загрузка новых частиц, проверка работоспособности установки и вывод ее на рабочий режим.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

При расчете коэффициентов самодиффузии было выявлено, что далеко не все корреляционные кривые поддаются однозначной аппроксимации с допустимым доверительным интервалом погрешности, как это описано выше. Особенно это касается структур, которые не имеют однородного фазового состава ввиду различной динамики колебаний частиц, как представлено на рис. 1б, в. Корреляционная функция, полученная экспериментально, не может быть аппроксимирована теоретически рассчитанными кривыми. Причина может быть в том, что структура имеет набор различных фазовых состояний в разных ее частях, определяющихся различными коэффициентами самодиффузии. Таким образом, в случае многокомпонентного фазового состава ППС могут быть описаны не одним коэффициентом самодиффузии, определяющимся по (2), а суммой экспонент:

$$g_2(\tau) = \sum \alpha_i e^{-\beta_i \tau}, \quad (4)$$

где α – нормировочный коэффициент, зависящий от интенсивности рассеянного излучения, $\beta = D * q^2$, q рассчитывается в соответствии с (2).

Был проведен эксперимент по определению коэффициента самодиффузии ППС, представлен-

ной на рис. 1в, для нижней и верхней ее частей отдельно. Получены корреляционные функции, представленные на рис. 2, которым соответствуют два разных значения коэффициента самодиффузии.

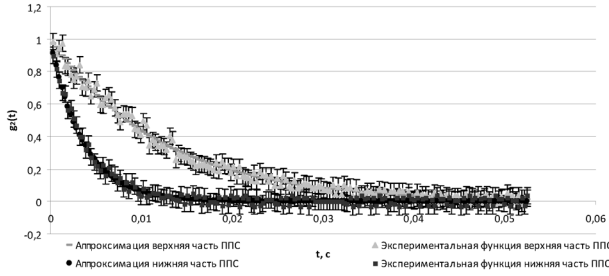


Рис. 2. Экспериментально полученные корреляционные кривые для верхней и нижней частей структуры, представленной на рис. 1в

Полученные значения коэффициентов самодиффузии: для верхней части структуры $D = 1,12 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$, для нижней $D = 1,89 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$ – свидетельствуют о различных фазовых составах ППС в различных ее частях. Данный вывод был сделан на основании расчета параметра неидеальности Γ , который является одним из основных характеризующих параметров фазового состояния ППС. Зависимость между параметром неидеальности Γ и коэффициентом самодиффузии приведена в работе [6] и представлена следующим выражением:

$$D \cong \frac{T_p \Gamma^*}{12\pi(\omega^* + \nu_{fr})m_p} \exp(-c_1 \frac{\Gamma^*}{\Gamma_c}), \quad (5)$$

где $\Gamma_c^* = 102$, $c_1 = 2,9$ для $\xi > 0,3$, $c_1 = 3,15$ для $\xi < 0,3$.

Для определения неидеальности необходимо рассчитать следующие параметры:

$\xi = \omega^* / \nu_{fr}$ – параметр масштабирования как отношение частоты колебаний макрочастиц к частоте столкновений макрочастиц с нейтралами;

$\omega^* = Z_p^* e \sqrt{n_p / \pi m_p}$ – частота колебаний макрочастиц;

$\nu_{fr} = \frac{C_n p}{R \rho}$ – частота столкновений макрочастиц с нейтралами.

На основании полученных экспериментальных данных для ППС, существующей в условиях: газ – Ar, материал частиц – Al_2O_3 , ток разряда – 0,6 мА, давление плазмообразующего газа – 60

Па и рассчитанных значений $\nu_{fr} = \frac{8,6 \cdot 60}{5 \cdot 3,95} = 26$

Гц, $\omega^* = Z_p^* e \sqrt{n_p / \pi m_p} \cong 21$ Гц, $\xi = \omega^* / \nu_{fr} = 1,23$, были получены значения $\Gamma = 87$ для верхней части ППС и $\Gamma = 112$ для нижней части. Полученные результаты согласуются с работой [6], где показано, что если параметр неидеальности $\Gamma > 106$, то ППС находится в состоянии плавления, а если

$\Gamma < 106$, то ППС находится в стадии кристаллизации. Таким образом, полученный результат согласуется с теоретическими расчетами.

Далее был проведен эксперимент по определению корреляционной функции для всего объема ППС и произведено сравнение с суммой корреляционных кривых верхней и нижней частей ППС для доказательства достоверности гипотезы и правомерности выражения (4), результаты представлены на рис. 3. При сравнении корреляционной функции, рассчитанной для всей ППС, и кривой, полученной при суммировании корреляционных кривых от верхней и нижней частей ППС, можно сделать вывод, что данные кривые совпадают в пределах погрешности.

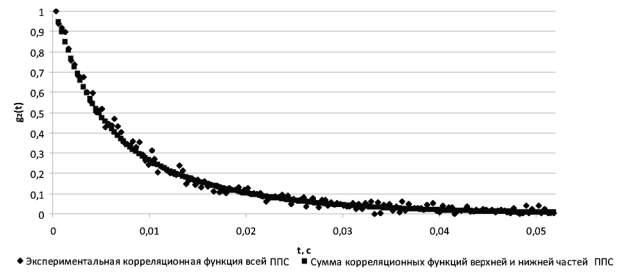


Рис. 3. Сравнение суммы корреляционных кривых верхней и нижней частей ППС и корреляционной кривой, полученной на основании измерения всего объема ППС

Для учета разницы в интенсивности рассеянного излучения для разных частей ППС введен коэффициент α , учитывающий величину интенсивности рассеянного излучения при измерении корреляционных кривых.

Для проверки адекватности модели (4) были рассчитаны коэффициенты самодиффузии для квазистационарной ППС, представленной на рис. 1а, и структуры с хаотическими колебаниями, представленной на рис. 1б, не имеющей выраженных дополнительных фазовых компонент. Расчеты показывают, что в случае однородных по фазовому состоянию структур вторая компонента отсутствует. Таким образом, при определении корреляционной функции неоднородных по фазовому состоянию структур можно разложить ее в ряд и вычислить коэффициенты самодиффузии, характеризующие динамику изменения фазового состояния структуры.

Был проведен анализ изменения значения коэффициента самодиффузии в зависимости от внешних параметров среды – тока разряда и давления плазмообразующего газа. В результате применения метода были рассчитаны коэффициенты самодиффузии для ППС, состоящей из частиц Al_2O_3 , левитирующих в аргоновой плазме, при диапазоне токов [0,3–3,5] мА и давлении 80 Па, размерами частиц в контейнере в диапазоне [5–60] мкм.

Полученный результат может быть интерпретирован следующим образом: при повышении

величины тока разряда ППС приобретает энергию, что приводит к изменению фазового состава – структура начинает «плавиться». Зарождение колебаний начинается в нижней части структуры и распространяется вверх. Таким образом, определенный промежуток времени можно наблюдать двухкомпонентную ППС, содержащую в себе два агрегатных состояния. Исходя из представленных данных на рис. 4, можно сделать вывод, что ППС, существующая в диапазоне тока разряда $[0,3; 0,6]$ мА, имеет только одно фазовое состояние, соответствующее кристаллической фазе. Далее, в диапазоне токов $[0,6; 2]$ мА ППС имеет две фазы одновременно. При превышении значения тока разряда свыше 2 мА ППС становится жидкостью.

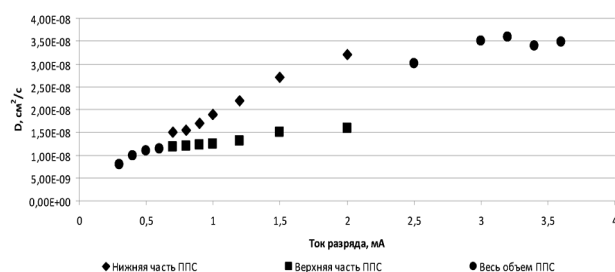


Рис. 4. Зависимость коэффициента самодиффузии от тока разряда (частицы Al_2O_3 , газ – Ar, $P = 80$ Па)

На основании полученных экспериментальных данных (рис. 5) были выведены зависимости значений коэффициентов самодиффузии от давления плазмообразующего газа. Рассчитаны коэффициенты самодиффузии для ППС, состоящей из частиц Al_2O_3 , левитирующих в аргоновой плазме, при изменении давления плазмообразующего газа в диапазоне $[25–120]$ Па и токе разряда 1,5 мА, размерами частиц в контейнере в диапазоне $[5–60]$ мкм. Видно, что при постепенном повышении давления (до 60 Па) энергия колебаний ППС уменьшается, что приводит к появлению упорядоченных областей в ППС, дальнейшее

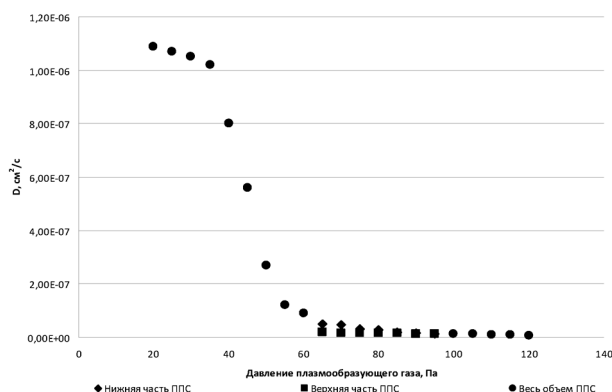


Рис. 5. Зависимость коэффициента самодиффузии от давления плазмообразующего газа. После достижения значения 60 Па начинается процесс кристаллизации (частицы Al_2O_3 , газ – Ar, $I = 1,5$ мА)

увеличение давления приводит к кристаллизации структуры до значения 90 Па. При увеличении давления плазмообразующего газа свыше 120 Па происходит разрушение ППС. Измеренный коэффициент самодиффузии (рис. 5) изменяется в соответствии с изменением структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод корреляционной спектроскопии для определения коэффициентов самодиффузии в пылевой плазме. На основании измеренных корреляционных функций плазменно-пылевых структур и коэффициента самодиффузии определено наличие областей с разным фазовым состоянием внутри плазменно-пылевой структуры. Показано, что метод корреляционной спектроскопии является новым эффективным методом для оценки фазового состояния комплексной плазмы и определения скорости протекания фазовых переходов. Определена динамика фазовых переходов в ППС в зависимости от давления плазмообразующего газа и тока разряда на основании оценок значений коэффициента самодиффузии.

* Работа частично поддержана грантом РФФ № 14-12-00094.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваулина О. С. Диффузия макрочастиц и критерии фазовых переходов для пылевых структур в слабоионизированной плазме // ЖЭТФ. 2002. Т. 121. В. 1. С. 35–46.
2. Ваулина О. С. Самоорганизация макрочастиц в слабоионизированной плазме // Материалы всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы ФНТП–2001. Петрозаводск, 2001. Т. 2. С. 111–114.
3. Ваулина О. С., Петров О. Ф., Фортон В. Е. Моделирование процессов массопереноса на малых временах наблюдения в неидеальных диссипативных системах // ЖЭТФ. 2005. Т. 127. В. 5. С. 1153–1165.
4. Ваулина О. С., Храпак С. А. Моделирование динамики сильновозмущающих макрочастиц в слабоионизированной плазме // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. № 2. С. 264–271.
5. Морфил Г. Е., Цытович В. Н., Томас Х. Комплексная плазма: II. Элементарные процессы в комплексной плазме // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 1. С. 3–36.
6. Нефедов А. П., Ваулина О. С., Петров О. Ф. и др. Динамика макрочастиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока в условиях микрогравитации // ЖЭТФ. 2002. Т. 122. В. 4. С. 778–788.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luizova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macroparticle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.

8. Chu J. Y. and Lin I. Direct observation of coulomb crystals and liquids in strongly coupled Rf dusty plasmas. // Physical review letters. 1994. Vol. 72. № 25. P. 4009–4012.
9. Lipaev A. M., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F., Torchinski V. M., Fortov V. E., Khrapak A. G. and Khrapak S. A. Ordered structures in a nonideal dusty glow-discharge plasma // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1997. № 112. P. 2030–2044.
10. Melzer A., Homann A., and Piel A. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // Phys. Rev. E 53. 1996. Issue 3. P. 2757.
11. Thomas H. M., Morfill G. E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. 1996. № 379. P. 806–809.

Karasev V. Yu., St. Petersburg State University (St. Petersburg, Russian Federation)

Shtykov A. S., Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

THE INVESTIGATION OF PHASE TRANSITION DYNAMICS IN DUSTY PLASMA BY CORRELATION SPECTROSCOPY METHOD

It is shown that the method of correlation spectroscopy can be used to study the kinetic processes in plasma-dust structures and the calculation of self-diffusion coefficients. The method of correlation spectroscopy is effective for evaluation of the phase state of the integrated plasma, to determine the speed of the processes of phase transitions and establishing the boundaries of their existence.

Key words: correlation spectroscopy, dusty plasma, self-diffusion coefficient, dynamics of phase transitions

REFERENCES

1. Vaulina O. S. Diffusion of the macroparticles and the criteria of phase transitions for dust structures in low-ionized plasma [Diffuziya makrochastits i kriterii fazovykh perekhodov dlya pylevykh struktur v slaboionizirovannoy plazme]. *ZhETF*. 2002. Vol. 121. Ch. 1. P. 35–46.
2. Vaulina O. S. Self-organization of the macroparticles in a low-ionized plasma [Samoorganizatsiya makrochastits v slaboionizirovannoy plazme]. *Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii po fizike nizkoterperaturnoy plazmy FNTF–2001*. Petrozavodsk, 2001. Vol. 2. P. 111–114.
3. Vaulina O. S., Petrov O. F., Fortov V. E. Modeling of mass transfer processes at small observation times in nonideal dissipative systems [Modelirovanie protsessov massopereenos na mal'kikh vremenakh nablyudeniya v neideal'nykh dissipativnykh sistemakh]. *ZhETF*. 2005. Vol. 127. Ch. 5. P. 1153–1165.
4. Vaulina O. S., Khrapak S. A. Modeling the dynamics of strongly particulates in a low-ionized plasma [Modelirovanie dinamiki sil'novzaimodeystvuyushchikh makrochastits v slaboionizovannoy plazme]. *ZhETF*. 2001. Vol. 119. № 2. P. 264–271.
5. Morfill G. E., Tsytovich V. N., Tomas K. H. Complex Plasma: II. Elementary processes in complex plasma [Kompleksnaya plazma: II. Elementarnye protsessy v kompleksnoy plazme]. *Fizika plazmy*. 2003. Vol. 29. № 1. P. 3–36.
6. Nefedov A. P., Vaulina O. S., Petrov O. F. et al. Dynamics of macroparticles in the plasma glow discharge of direct current in microgravity [Dinamika makrochastits v plazme tleyushchego razryada postoyannogo toka v usloviyakh mikrogravitatsii]. *ZhETF*. 2002. Vol. 122. Ch. 4. P. 778–788.
7. Bulba A., Khakhaev A., Luizova L., Podryadchikov S., Scherbina A., Shtykov A. The Influence of Physical-Chemical Characteristics of Plasma-Forming Gas and Macroparticle Matter in Complex Plasma on Ordered Structure Self-Organization // International Conference on Physics of Dusty Plasmas. France, Orlean, 2005. AIP. V799. P. 359.
8. Chu J. Y. and Lin I. Direct observation of coulomb crystals and liquids in strongly coupled Rf dusty plasmas. // Physical review letters. 1994. Vol. 72. № 25. P. 4009–4012.
9. Lipaev A. M., Molotkov V. I., Nefedov A. P., Petrov O. F., Torchinski V. M., Fortov V. E., Khrapak A. G. and Khrapak S. A. Ordered structures in a nonideal dusty glow-discharge plasma // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1997. № 112. P. 2030–2044.
10. Melzer A., Homann A., and Piel A. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // Phys. Rev. E 53. 1996. Issue 3. P. 2757.
11. Thomas H. M., Morfill G. E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. 1996. № 379. P. 806–809.

Поступила в редакцию 15.06.2015