

Например, при концентрации аэрозольных частиц порядка $n_d \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, размере порядка микрометра, работе выхода и температуре порядка 1 эВ концентрация свободных электронов достигает величины $n_e \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а при $n_d \sim 10^{15} \text{ см}^{-3} — n_e \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Поскольку столь высокая концентрация электронов достигается в слое толщиной порядка десятков микрометров, градиент концентрации оказывается очень большим.

Заключение

За счет поверхностной ионизации частичек аэрозольного тумана создается тонкий слой с высоким градиентом электронной концентрации, направленный по радиусу, который может обеспечить условия захвата и канализации оптического излучения. Этот механизм также может быть реализован и в холодном тороидальном атмосферном вихре. Если в такой вихрь инжестировать некото-

рое количество аэрозольных частиц с достаточно малой работой выхода, то в результате их разогрева (внешним лазерным излучением, например) можно создать достаточно высокую концентрацию свободных электронов. Подобный метод свободен от отмеченных выше недостатков создания тороидального плазменного вихря с помощью взрыва металлических мембран.

Литература

1. Кунин В. Н., Пleshivtsev В. С., Фуров Л. В. // ТВТ. 1997. Т. 35. С. 866.
2. Ignatov A. M., Furov L. V., Kunin V. N., Pleshivtsev V. S., Rukhadze A. A. Artificial Fireball as Dust-Plasma Cloud. In: Frontiers in Dusty Plasmas. Proc. Second Int. Conf. on the Physics of Dusty Plasmas. Elsevier. 2000. P. 477 (Y. Nakamura, T. Yokota, P. K. Shukla, Eds.).
3. Фортвов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А., Молотков В. И., Петров О. Ф. // УФН. 2004. Т. 174. С. 495.
4. Vishnyakov V. I., Dragan G. S. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74.

Статья поступила в редакцию 1 августа 2008 г.

On the origin of critical refraction in a toroidal plasma vortex

A. M. Ignatov, V. N. Kunin, V. S. Pleshivtsev, A. A. Rukhadze
A. M. Prokhorov General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

We discuss the growth of the free electron concentration at the edge of a toroidal plasma vortex provided by the thermal electron emission from the surface of aerosol particulates. According to our estimations, the increase in electron concentration may yield trapping and canalizing the optical radiation.

PACS: 52.25.-b

УДК 539.173: 533.9

Самоорганизация пылевых частиц в плазме пучка протонов

Л. В. Депутатова, В. И. Владимиров, В. С. Филинов, В. Е. Фортвов
Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

А. П. Будник, П. П. Дьяченко, В. А. Рыков, К. В. Рыков
ГНЦ РФ "Физико-энергетический институт им. акад. А. И. Лейпунского", г. Обнинск, Россия

Представлены результаты исследования поведения пылевых частиц в плазме, формируемой пучком протонов в инертных газах (He, Ar, Kr). Впервые в области пучка протонов получены стабильные упорядоченные пылевые структуры — "плазменно-пылевой кристалл" из пылевых частиц диаметром 1,0; 3,0, 4,8 мкм. Развита математическая модель, позволившая провести численное моделирование образования кристалла из пылевых частиц в плазме, формируемой пучком протонов.

PACS: 52.50.-b

Введение

Самоорганизация пылевой компоненты в плазме, содержащей специально внедренные частицы с микронными размерами, вызывает неослабевающий интерес [1]. Это объясняется как необычными свойствами пылевой плазмы, так и возможностями проведения экспериментов, в которых можно визуально наблюдать процессы, приводящие к образованию упорядоченных структур жидкостного или кристаллического типа, и изучать их свойства. Впервые пылевые структуры кристаллического типа были получены в газоразрядной плазме [2]. Эти эксперименты дали мощный импульс дальнейшим исследованиям в области пылевой плазмы, как в наземных лабораториях, так и в условиях микрогравитации [3]. Наиболее часто в опытах используются инертные газы, в которых первоначально инициируется газовый разряд того или иного типа, а затем в ионизованную среду вбрасываются пылевые частицы. В современных экспериментах, как правило, применяются частицы с малой дисперсией по размерам со сферической или другой строго контролируемой формой.

В то же время ионизованная среда может быть создана быстрыми заряженными частицами, например альфа- и бета-частицами, осколками деления атомных ядер, ионными и электронными пучками. В процессе торможения в газе в области трека заряженной частицы образуется рекомбинационно-неравновесная плазма, сильно неоднородная в пространстве и быстро рекомбинирующая во времени. Число созданных за время торможения электронно-ионных пар N обычно очень велико. Так при энергетической цене рождения пары порядка 30 эВ один осколок деления атомного ядра с энергией ≈ 100 МэВ при полном торможении в газе создает $\approx 3 \cdot 10^6$ пар ионов.

Ионизация молекул среды приводит к появлению электронов первого поколения, часть из которых имеет энергию, достаточную для ионизации других атомов. Так образуется спектр электронов, включающий в себя электроны всех последующих поколений и имеющий неравновесный характер распределения по скоростям. Из-за большей подвижности электронов динамическое равновесие между токами электронов и ионов устанавливается при отрицательном заряде пылинки. Этот заряд при высокой энергии электронов может стать большим, чем в случае равновесного распределения по скоростям, что создает условия для ее кристаллизации.

В работах [2, 4] изучался процесс образования пылевых структур в ядерно-возбуждаемой плазме, образованной осколками деления и альфа-частицами, вылетающими из радиоактивного источ-

ника ^{252}Cf . Было показано, что в такой среде при определенных условиях образовывались вихревые и квазистационарные пылевые облака жидкостного типа. Наблюдалось ламинарное течение пылевой жидкости к высоковольтному электроду самоорганизующимися струями. Однако в опытах не наблюдалась кристаллизация пылевой компоненты. Это может быть объяснено сильной пространственно-временной неоднородностью плазмы, приводящей к флуктуациям зарядов пылевых частиц, сравнимых с их значениями [5]. Кроме того, поскольку эксперименты проводились при высоких значениях давления газов, на поведение пылевых облаков сильное влияние оказывала нейтральная компонента среды [4]. Ограничения на интенсивность радиоактивных источников, используемых в лабораторных условиях, обуславливает временные флуктуации свойств плазмы. В то же время экспериментально ядерно-возбуждаемая плазма с успехом моделируется с использованием ускорителей заряженных частиц. В этом случае пучок ионизирующих частиц обладает малой расходимостью, обусловленной только многочисленными ион-атомными столкновениями, а ток пучка можно сделать достаточно большим для того, чтобы треки ионов имели за время своего существования значительное перекрытие — флуктуация свойств плазмы существенно уменьшается.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании поведения пылевых частиц в трековой плазме, создаваемой пучком ускоренных протонов, и получении в ней упорядоченных структур пылевых частиц кристаллического типа. Значительная роль в интерпретации экспериментальных результатов принадлежит компьютерному моделированию процессов, приводящих к образованию кристаллических структур.

Результаты этих исследований впервые позволили обнаружить новые эффекты, связанные с коллективными явлениями в плазменно-пылевых структурах. Впервые наблюдалось образование кристалла пылевых частиц в трековой плазме. Это явление может представлять интерес не только для фундаментальной науки, но и для практического использования в плазменных и пучковых технологиях, бурно развивающихся в настоящее время.

Экспериментальная установка

Эксперименты проводились в ГНЦ РФ "ФЭИ" на электростатическом ускорителе ЭГ-2,5, который позволяет получить протонный пучок с энергией протонов до 2,5 МэВ и током 0,5—30 мкА (от $3 \cdot 10^{12}$ до $1,8 \cdot 10^{14}$ протон./с). Сепарированный, моноэнергетичный, горизонтальный пучок прото-

нов через закрытое тонкой титановой фольгой окно направляли внутрь экспериментальной ячейки (рис. 1), изготовленной из нержавеющей стали, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда со стороной основания 8 см и высотой 12 см и установленной на место мишенного устройства. На двух боковых гранях ячейки были смонтированы смотровые окна, через которые осуществлялась подсветка исследуемого объема и велось наблюдение за поведением пылевых структур.

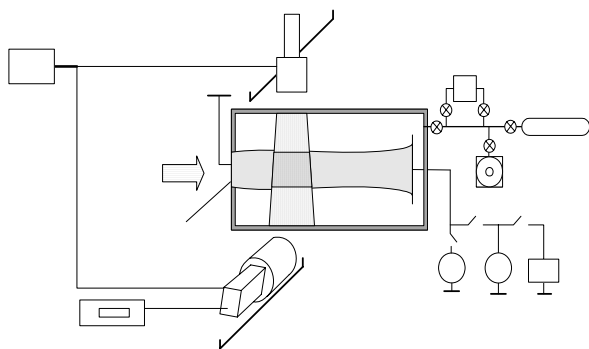


Рис. 1. Экспериментальная ячейка

Внутреннее пространство экспериментальной ячейки подсвечивалось сформированным цилиндрическими линзами плоским лазерным лучом ("лазерный нож") с перетяжкой ~ 100 мкм. Рассеянный частицами лазерный свет регистрировался ПЗС-телекамерой. Сканирование внутреннего пространства экспериментальной ячейки осуществлялось одновременным перемещением лазера и телекамеры.

Пучок протонов вводили внутрь ячейки через титановую фольгу толщиной 10 мкм и диафрагму с диаметром 8 мм. При прохождении через фольгу протоны теряли часть своей энергии (0,5 МэВ). Эксперименты проводили при токах пучка протонов 0,5; 1,0 и 3,0 мкА с плотностью, приблизительно постоянной по всей площади сечения пучка. Ячейку заполняли чистым газом или газопылевой смесью. Использовались He, Ar, Kr. Заземленная титановая фольга играла роль опорного электрода, на расстоянии 70 мм от фольги располагали высоковольтный электрод, на который подавали отрицательный потенциал. В экспериментах использовали монодисперсные частицы из меламинформальдегида диаметром 1,0; 3,0 и 4,82 мкм и плотностью 1,5 г/см.

Экспериментальная ячейка откачивалась, а газопылевая смесь внутри ячейки создавалась с помощью резкого импульсного воздействия потока исследуемого газа, поступающего из дозатора с фиксированным объемом на контейнер с пылевыми частицами. Частицы могли также вбрасываться в объем ячейки и небольшими порциями при встряхивании контейнера с сетчатым дном. Дав-

ление газа измерялось прецизионным мембранно-емкостным манометром типа "Баратрон".

Формирование пылевых структур в центральной области пучка протонов

При давлении менее 20 Торр в пучке протонов вблизи высоковольтного электрода формируется пылевая структура, которая разрушается при прекращении пучка протонов или выключении напряжения, приложенного к высоковольтному электроду. Процесс образования пылевых структур в пучке протонов показан на рис. 2.

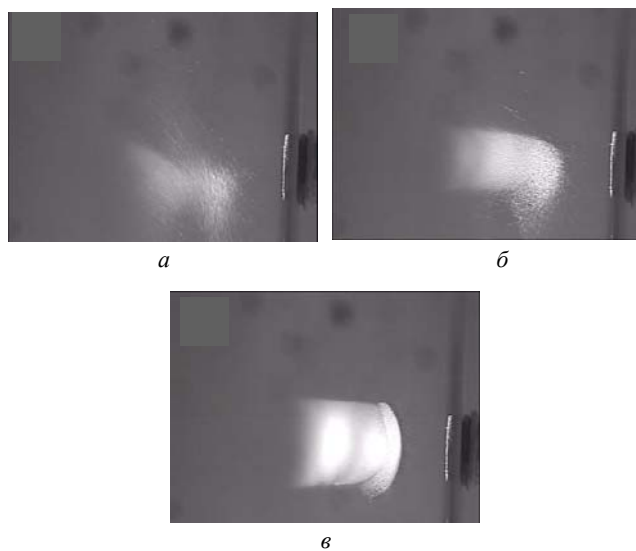


Рис. 2. Процесс образования пылевых структур (газ — Ne, ток пучка 3 мкА, давление 2 Торр, напряжение 280 В, полидисперсные частицы CeO_2 со средним размером 1 мкм):
а — вброс пыли; б — спустя 0,5 с после вброса;
в — спустя 1 с после вброса

Пылевые структуры имеют в положении равновесия цилиндрическую симметрию с максимальным диаметром, совпадающим с диаметром пучка. Структуры образуются во всех использованных в эксперименте газах. Наблюдалась слабая зависимость от типа газа, выражающаяся в изменении при одном и том же давлении газа минимального значения потенциала высоковольтного электрода, при котором существуют устойчивые структуры.

При давлении ~ 1 Торр в области пучка протонов в расстоянии 8—10 мм от электрода при вбрасывании пылевых частиц формируется плотная пылевая структура,двигающаяся к электроду. При этом пылевые частицы проходят сквозь нее и выходят из пучка. Треки пылевых частиц представлены на рис. 3, а. Следует отметить, что частицы,двигающиеся в пучке, не пополняли ранее сформированную плотную пылевую структуру. Часть частиц,

поднявшихся в верхнюю часть экспериментальной ячейки, спустилась в область пучка протонов перед плотной пылевой структурой, формируя следующую (см. рис. 3, б). Видно, что пылевые частицы с самого начала падали на расстоянии $\approx 0,2$ мм от плотной структуры, образовавшейся ранее. Пылевые частицы во второй пылевой структуре сформировались в пылевой кристалл (см. рис. 3, в), который содержал ~ 500 частиц. Парная корреляционная функция, рассчитанная при обработке 15 последовательных кадров для этой структуры, представлена на рис. 4. В выделенном сечении пылевые частицы образовывали квадратную решетку с расстоянием между узлами

140 мкм. Это следует из сравнения парной корреляционной функции для структуры (см. рис. 3, в) с парной корреляционной функцией для идеальной квадратной решетки. Аналогичные хорошо упорядоченные структуры формировались в плазме аргона и гелия из частиц диаметром 1,0; 3,0 и 4,82 мкм. Расстояния между частицами менялись от 80 до 140 мкм. Заряд пылевых частиц лежал в интервале 500—1000 элементарных зарядов, радиус Дебая — в интервале 100—250 мкм, а параметр неидеальности Γ — в пределах 200—500. Для кристалла, представленного на рис. 3, заряд пылевых частиц равнялся 970 e , радиус Дебая — 210 мкм и $\Gamma = 390$.

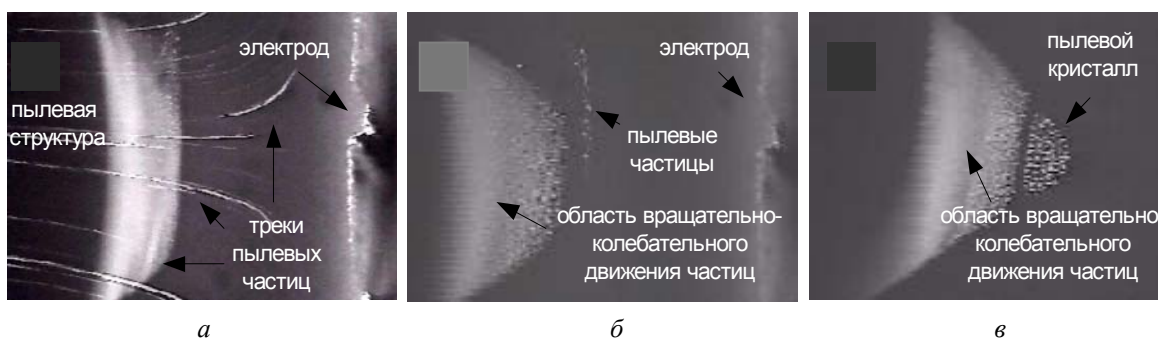


Рис. 3. Эволюция изменения формы осевой пылевой структуры в процессе формирования пылевого кристалла (газ — криптон, частицы — меламинформальдегид диаметром 3 мкм, давление газа 1 Торр, напряжение на электроде 140 В, ток пучка 3 мкА, размер кадра 6×8 мм):
 а — пролет пылевых частиц сквозь пылевую структуру, выброшенных в наблюдаемую область из контейнера;
 б — кристаллизация пылевой структуры; в — пылевой кристалл, расстояние между частицами 140 мкм

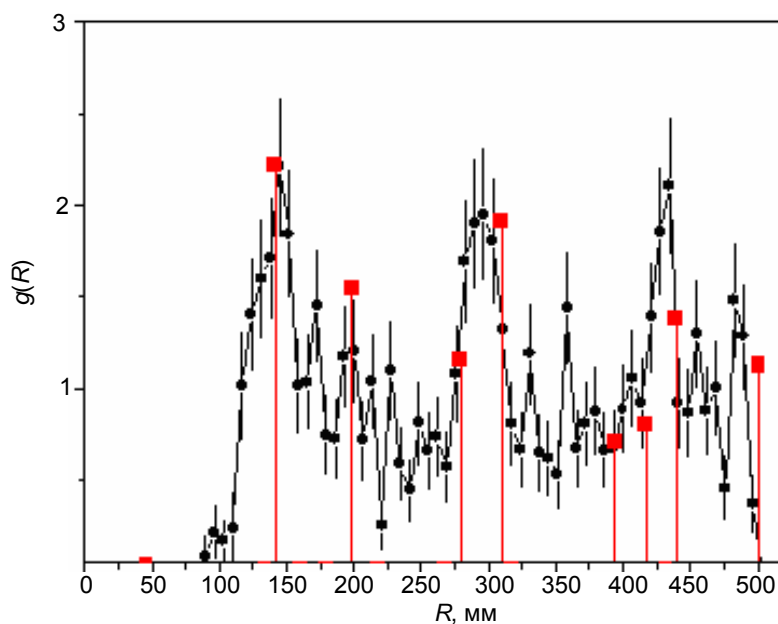


Рис. 4. Парная корреляционная функция, рассчитанная для пылевого кристалла, показанного на рис. 3, в. (Среднее расстояние между частицами 140 мкм)
 —●— эксперимент; ■— идеальный кристалл (дельта-функции)

Пылевая структура обладает свойством насыщения. Добавление частиц приводило к образованию не только второй, но и третьей пылевой структуры (рис. 5). В ряде экспериментов наблюдалось до 4—5 пылевых структур. Концентрация частиц в структурах падает по мере приближения к электроду. Каждая из структур отделена плазменным промежутком, не содержащим пылевых частиц. На рис. 5 слева показан процесс образования третьей упорядоченной структуры, справа — расположение пылевых частиц в сформированной структуре. Хорошо видны плазменные области, свободные от пылевых частиц. Формирование в области пучка ряда пылевых структур с четкими границами, отделенными одна от другой промежутками плазмы, не содержащими пылевых частиц, указывает на неоднородность плазмы вдоль пучка. Это трудно было ожидать, учитывая, что длина пробега протонов значительно больше размеров экспериментальной ячейки.

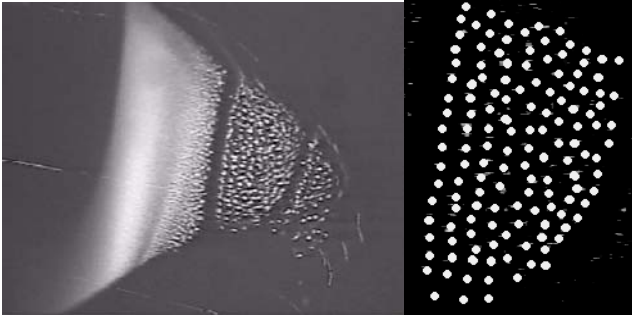


Рис. 5. Добавление частиц, приводящее к образованию третьей пылевой структуры, расположение частиц в этой структуре.
(Размер кадра 6×8 мм)

Численное моделирование процесса формирования пылевых структур

Для численного моделирования временной эволюции системы пылевых частиц использовался метод Броуновской динамики. Предполагалось, что вес пылевых частиц и силы "дрэга" (увлечения ионными потоками) полностью компенсируется электрическими полями, что приводит к стационарной левитации частиц в экспериментальной ячейке. Тогда эволюция подсистемы пылевых частиц описывается системой динамических уравнений:

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_j F_{int}(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|) - m_d \nu_{fric} \frac{d\vec{r}_i}{dt} + F_{tr}(\vec{r}_i) + F_i^{Br},$$

где $i = 1, \dots, N_d$; N_d — число пылевых частиц;

m_d — масса пылевой частицы;

F_{tr} — сила, обусловленная объемным положительным зарядом плазмы, удерживающим пылинку в пучке протонов;

ν_{fric} — характерная частота трения, стохастические дельта-коррелированные силы F^{Br} описывают столкновения пылевых и плазменных частиц;

F_{int} — силы, действующие на пылинку со стороны других пылевых частиц:

$$F_{int}(\vec{r}_i) = -\frac{1}{2} \nabla_i [\sum_{l,k} U(\vec{r}_i, \vec{r}_k)].$$

Эффективный потенциал взаимодействия $U(\vec{r}_k, \vec{r}_k)$ учитывает экранировку пылинок плазменными частицами, зависимость заряда пылинок от положения в пространстве и возникновение около каждой пылинки локальных областей с повышенной плотностью ионов в направлении дрейфовых потоков [6]:

$$U(\vec{r}_l, \vec{r}_k) = \frac{Q_-(\vec{r}_l)Q_-(\vec{r}_k)}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_l - \vec{r}_k|} \exp\left(-\frac{|\vec{r}_l - \vec{r}_k|}{r_D}\right) + \frac{Q_-(\vec{r}_l)Q_+(\vec{r}_k + d\vec{e}_k)}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_l - \vec{r}_k - d\vec{e}_k|} \exp\left(-\frac{|\vec{r}_l - \vec{r}_k - d\vec{e}_k|}{\bar{r}_D}\right) + \frac{Q_-(\vec{r}_k)Q_+(\vec{r}_l + d\vec{e}_l)}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_k - \vec{r}_l - d\vec{e}_l|} \exp\left(-\frac{|\vec{r}_k - \vec{r}_l - d\vec{e}_l|}{\bar{r}_D}\right) + \frac{Q_+(\vec{r}_k + d\vec{e}_k)Q_+(\vec{r}_l + d\vec{e}_l)}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_k + d\vec{e}_k - \vec{r}_l - d\vec{e}_l|} \exp\left(-\frac{|\vec{r}_k + d\vec{e}_k - \vec{r}_l - d\vec{e}_l|}{\bar{r}_D}\right),$$

где Q_- и \vec{r}_l — заряд и радиус-вектор пылинки с номером l ($l = 1, \dots, N_d$), соответственно;

\vec{e} — единичный вектор, задающий локальное направление ионного потока;

Q_+ — эквивалентный положительный заряд, характеризующий локальное повышение плотности ионов на расстоянии d ($d \ll \bar{r}_D$) от пылинки в направлении дрейфового потока ионов [6].

Вектор \vec{e} совпадает с направлением пучка протонов и основного дрейфового потока ионов, падающих на высоковольтный электрод с отрицательным потенциалом. Для Q_+ использовалась аппроксимация [7]:

$$Q_+(\vec{r}_l + d\vec{e}_l) = -\frac{Q_-(\vec{r}_l)}{2} \left\{ 1 - \min \left[1, \max_{k \neq l} \times \left(\exp \left(-\left| \frac{\vec{r}_l + d\vec{e}_l - \vec{r}_k}{\bar{r}_D} \right|^\alpha \right) \right) \right] \right\},$$

где $\alpha \geq 2$.

Функция Q_+ убывает от $-Q_-/2$ до 0, если одна или несколько пылинок оказываются в дебаевской

окрестности пылинки с номером l . В результате эффективный потенциал взаимодействия пылинок $U(\vec{r}_k, \vec{r}_l)$ ограничен снизу, что является физической причиной термодинамической устойчивости классической подсистемы пылевых частиц [7, 8]. Заметим, что пылинки, расположенные в плоскости перпендикулярной вектору \vec{e} , отталкиваются, а пылинки, расположенные вдоль вектора \vec{e} , притягиваются. Потенциальная функция, обусловленная объемным положительным зарядом, который удерживает пылинки в пучке протонов, аппроксимировалась выражением [9]: $U_{tr}(\vec{r}_l) = A(x_l^2 + y_l^2)^\eta$, где $\eta \geq 1$ ($F_{tr} = -\nabla U_{tr}$), а A — подгоночная константа, зависящая от диаметра пучка протонов. Для учета флуктуаций заряда пылинок примем, что заряд Q_- и автокорреляционная функция флуктуаций заряда δQ_- имеют вид [10]:

$$Q_-(\vec{r}_l) = \bar{Q}_-(\vec{r}_l) + \delta Q_-(t, \vec{r}_l);$$

$$\langle \delta Q_-(t, \vec{r}_l) \delta Q_-(t', \vec{r}_l) \rangle = \langle \delta Q_-^2 \rangle \exp\left(-\frac{|t-t'|}{\tau}\right),$$

где \bar{Q}_- — средний заряд пылинки введен для описания систематической зависимости заряда от пространственного положения пылинки;

τ — характерное время корреляции флуктуации зарядов.

Рассмотрение процессов разрядки и зарядки пылинок микронных размеров позволяет оценить $\langle \delta Q_-^2 \rangle \sim 0,5\sqrt{|Q_-|}$ и $\tau \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ с [10]. Однако корреляционное время, связанное с локальным перераспределением ионных потоков, вызванным движением пылинок, на несколько порядков больше $\tau \sim 10^{-1}$ с. Как оказалось, высокочастотные флуктуации заряда практически не влияют на результаты, поэтому все вычисления были выполнены для $\tau \sim 10^{-1}$ с, $\bar{Q}_-(\vec{r}_l) \sim 300 e$, пылинок размером ~ 3 мкм с удельной плотностью $\rho = 5 \text{ г/см}^3$ и характерных для условий газового разряда температурой газа $T_g = 300 \text{ К}$ и параметров $v_{fric} = 5 \text{ с}^{-1}$, $\vec{r}_D \sim 100$ мкм. Приток энергии от дельта-коррелированных гауссовых сил F^{Br} и потери энергии за счет трения о газ (v_{fric}) компенсировались. В результате средняя кинетическая энергия пылинок в отсутствие флуктуаций зарядов равнялась $3kT_g/2$.

На рис. 6 показаны виды (а) и (б) типичной конфигурации пылевых частиц, полученные в результате расчетов. Пучок протонов и дрейфовый поток плазменных ионов направлены слева направо на высоковольтный отрицательный электрод, расположенный справа.

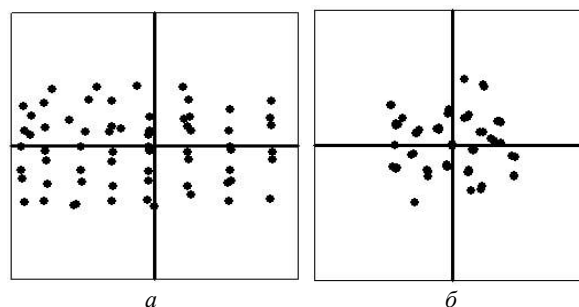


Рис. 6. Виды типичной конфигурации пылевых частиц в плазме поперек (а) и вдоль (б) пучка протонов

Отрицательный заряд возрастал по модулю слева направо, увеличивая взаимодействие между ними. В процессе эволюции из случайного начального состояния пылинки, равномерно распределенные по расчетной ячейке (показанной отрезками прямых), собирались в области, расположенной вдоль оси пучка. При этом средняя по пылинкам кинетическая энергия сначала резко возрастала за счет уменьшения потенциальной энергии, а затем за счет потерь на трение уменьшалась и приближалась к $3kT_g/2$ для случая фиксированных зарядов пылинок. В случае $\tau \sim 10^{-1}$ с стационарное значение средней кинетической энергии на одну пылинку была порядка $2kT_g - 3kT_g$. Временные флуктуации значений этой величины были порядка 30—50 %. Как следует из рис. 6, пылинки в области пучка образуют кристаллоподобные структуры. Характерной особенностью возникающих структур является стратификация, проявляющаяся в чередовании перпендикулярных протонному пучку слоев пылевых частиц и слоев с увеличенной концентрацией объемного положительного заряда, вызванного фокусирующим действием заряда пылинок на дрейфовые ионные потоки. Наблюдаемые нарушения регулярной структуры связаны с тепловыми и зарядовыми флуктуациями, за счет которых пылинки колеблются около регулярно расположенных положений равновесия. На рис. 6, а отчетливо видно, что возрастание модуля отрицательных зарядов пылинок (слева направо) приводит к росту отталкивания и возрастанию расстояния между частицами в кристаллоподобной структуре. На рис. 7 представлена экспериментально наблюдаемая пылевая структура, подобная полученной при моделировании.

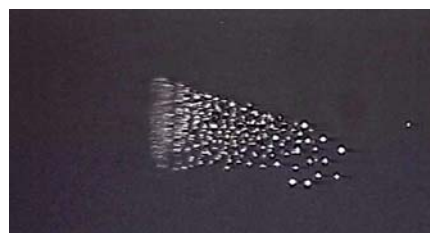


Рис. 7. Пылевая структура.

Размер кадра 6×8 мм (газ — аргон, смесь частиц — диаметрами 1,01 и 4,82 мкм, давление газа 1 Торр, напряжение на электроде 140 В, ток пучка 0,5 мкА)

Заключение

Основные итоги работы — определение условий, при которых в плазме инертного газа, образованной пучком протонов, формируются пылевые структуры, в частности, плазменно-пылевой кристалл: в области распространения пучка протонов с энергией ~ 2 МэВ и плотностью от $6 \cdot 10^{12}$ — $36 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ при давлении плазмообразующего газа 1—10 Торр в электрическом поле формируются пылевые структуры, при давлении ~ 1 Торр из монодисперсных частиц с диаметрами 1,0; 3,0 и 4,8 мкм — плазменно-пылевой кристалл во всех газах, использованных в экспериментах (гелий, аргон, криптон). Процесс кристаллизации слабо зависел от вида газа. Пылевые частицы формировали кубическую решетку с расстояниями между частицами от 80 до 140 мкм. Параметр неидеальности для полученных пылевых кристаллов лежал в интервале от 200 до 500. В плазме, образованной жестким ионизатором, пылевой кристалл получен впервые в мире. Проведено численное моделирование временной эволюции системы пылевых частиц методом Броуновской динамики, показавшее реалистичность выбранной модели.

Авторы благодарны А. И. Чусову за помощь в проведении экспериментов и изготовлении деталей экспериментальной установки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 05-08-33650, 07-08-13612 офиц.).

Литература

1. Фортв В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. // УФН. 2004. Т. 174. № 5. С. 495—544.
2. Thomas H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 652.
3. Nefedov A. P. et al. // New J. Phys. 2003. V. 5. P. 33.
4. Рыков В. А., Депутатова Л. В., Владимиров В. И., Фортв В. Е., Худяков А. В. // ЖЭТФ. 2001. Т. 120. Вып. 2(8). С. 353—365.
5. Rykov V. A., Khudyakov A. V., Filinov V. S., Vladimirov V. I., Deputatova L. V., Krutov D. V., Fortov V. E. // New J. Phys. 2003. V. 5. № 129. P. 1—17. <http://www.njp.org>
6. Рыков В. А., Рыков К. В., Владимиров В. И., Депутатова Л. В., Филинов В. С. // Докл. Академии наук. 2004. Т. 398. № 1. С. 50—53.
7. Schweigert V. A., Schweigert I. V., Melzer A., Homann A., Piel A. // Phys. Rev. E. 1996. V. 54. P. 4155—4162.
8. Lieb E. H., Thirring W. // Phys. Rev. Lett. 1975. V. 31. P. 111—113.
9. Ruelle D. Statistical Mechanics, Rigorous Results, W. A. Benjamin Inc. — New York—Amsterdam, 1969. — 410 p.
10. Белоцерковский О. М., Захаров И. Е., Нефедов А. П. и др. // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. Вып. 3. С. 819—836.

Статья поступила в редакцию 19 июня 2008 г.

Self organization of dust particles in the proton beam plasma

L. V. Deputatova, V. I. Vladimirov, V. S. Filinov, V. E. Fortov
Institute for High Energy Density RAS, Moscow, Russia

A. P. Budnik, P. P. Dyachenko, V. A. Rykov, K. V. Rykov
SSC RF-Institute for Physics and Power Engineering name after A. I. Leipunsky, Obninsk, Russia

In this work we present results of studies of dust crystal generated in plasma by the slowing-down proton beam in inert gases (He, Ar, Kr). For the first time in a region of the proton beam stable ordered dusty formations – "dusty plasma crystal" from dust grains of 1.0; 3.0; 4.8 μm diameters were obtained. The mathematical model that allowed us to perform numerical simulation of the crystal formation from dust grains in the proton beam plasma has been developed.

PACS: 52.50.-b