

Лекция 8

Экспериментальная установка для изучения свойств пылевой плазмы на основе высокочастотного RF разряда

Цель лекции: Описать экспериментальную установку для исследования пылевой плазмы и принцип ее работы

Описание экспериментальной установки

Для исследования свойств пылевой плазмы была использована экспериментальная установка на основе емкостного высокочастотного разряда. Фотография экспериментальной установки представлена ниже на рисунке 8.1. Подробное описание дано в работах [44-46].



Рисунок 8.1 – Фотоизображение экспериментального стенда на основе высокочастотного емкостного разряда для генерации плазменно-пылевых структур

На рисунке 8.2 представлена принципиальная диаграмма экспериментального стенда.

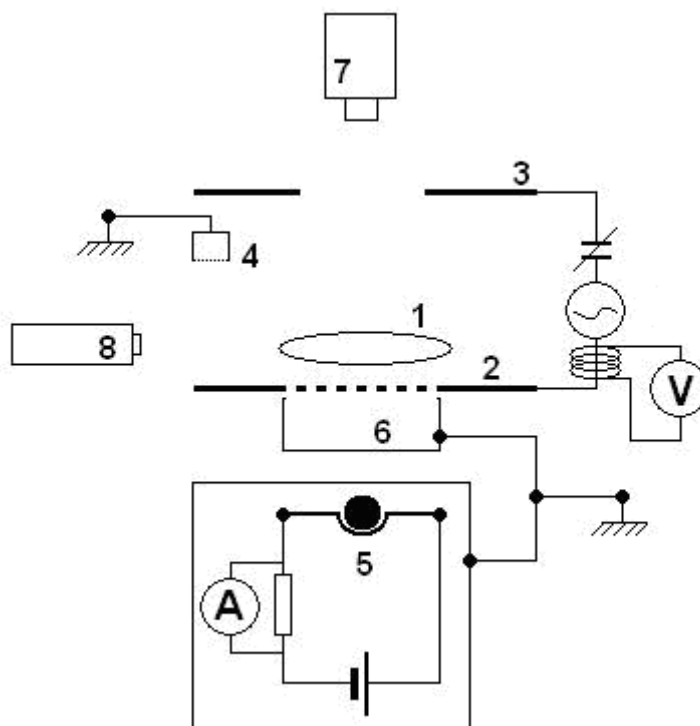


Рисунок 8.2 – Принципиальная диаграмма экспериментальной ВЧ установки

Экспериментальная установка в целом включает в себя следующие элементы:

1. ВЧ – камера. Она изготовлена из нержавеющей стали в виде цилиндрической трубы. Объем камеры составляет примерно 20 литров, внутри нее расположены два плоских электрода в виде диска диаметром 10 см, сделанные из нержавеющей стали. Для удобства камера оснащена стеклянными окошками (иллюминаторами) с трех сторон, которые дают возможность освещать пылевые структуры, а также наблюдать их и регистрировать.

2. Вакуумная система. Была задействована специальная установка низкого давления ВУП-5 (Вакуумный универсальный пост). Основными элементами ВУП-5, задействованными в данном эксперименте, являются

форвакуумные и диффузионные насосы с водным охлаждением и датчики давления. Управление вакуумной системой полностью автоматизировано.

3. ВЧ – генератор ($f=13.56$ МГц) мощностью $W=0 \div 50$ Вт.

4. Система измерения давления рабочего газа в ВЧ – камере. Для этого использовалось специальное оборудование «САПФИР-22МТ», предназначенное для измерения давления низкого диапазона.

5. Система иллюминации. Система иллюминации содержит: 1) твердотельный лазер зеленого спектра с диодной накачкой и мощностью 250 мВт; 2) Оптическая система, состоящая из телескопа для расширения лазерного пучка, а также из цилиндрической линзы, которая обеспечивает «лазерный нож».

6. Система регистрации. Для этого использовалась скоростная ССД камера (25 кадр/секунд) которая записывает видеоизображения пылевых структур.

7. Система сохранения видео изображения и их обработка (оцифровка), «база данных». Для этого использовался мощный персональный компьютер со специальной встроенной платой видео захвата (Pinnacle Studio 9).

8. Контрольно измерительные приборы (осциллограф, вольтметр, амперметр).

В вакуумной камере разряд ёмкостного типа мощностью до 20 Вт при давлениях от 0.1 до 2 торр поддерживается с помощью высокочастотного генератора ($f = 13,56$ МГц), который подсоединен к нижнему электроду через блок связи и соединительную самосогласующуюся емкость.

Разряд наблюдается между двумя параллельными электродами на расстоянии между электродами до 2 см (рисунок 8.3). Нижний электрод всегда выполняется в виде диска, а верхний – в виде кольца, либо в виде сетки. Разряд создается в инертном газе при давлениях от 10^{-1} до единиц торр. Подаваемая в ВЧ- разряд мощность оценивается по порядку величины в 1-15 Вт. Пылевые частицы со средними размерами 5-120 мкм инжестируются с помощью контейнера над плазмой.

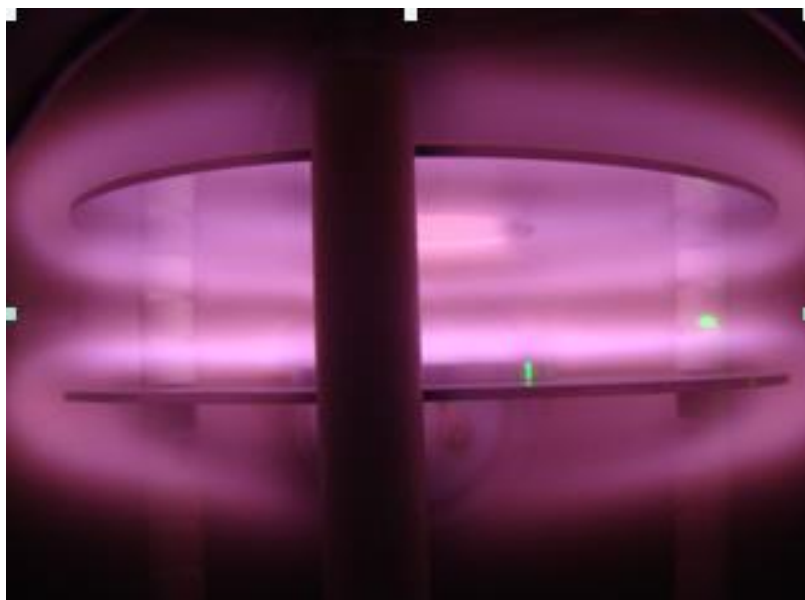


Рисунок 8.3 - Экспериментальная установка в рабочем режиме

Для визуализации пылевых частиц использовалась подсветка в горизонтальной или вертикальной плоскостях с помощью зондирующего лазерного луча, который с помощью линзы создавал плоский лазерный «нож» толщиной около 300 микрон (рисунок 2.4). Рассеянный свет регистрируется ПЗС видеокамерой. Видеоизображения, полученные с помощью видеокамеры, сохраняются в памяти компьютера для последующей обработки с помощью специальных пакетов программного обеспечения.

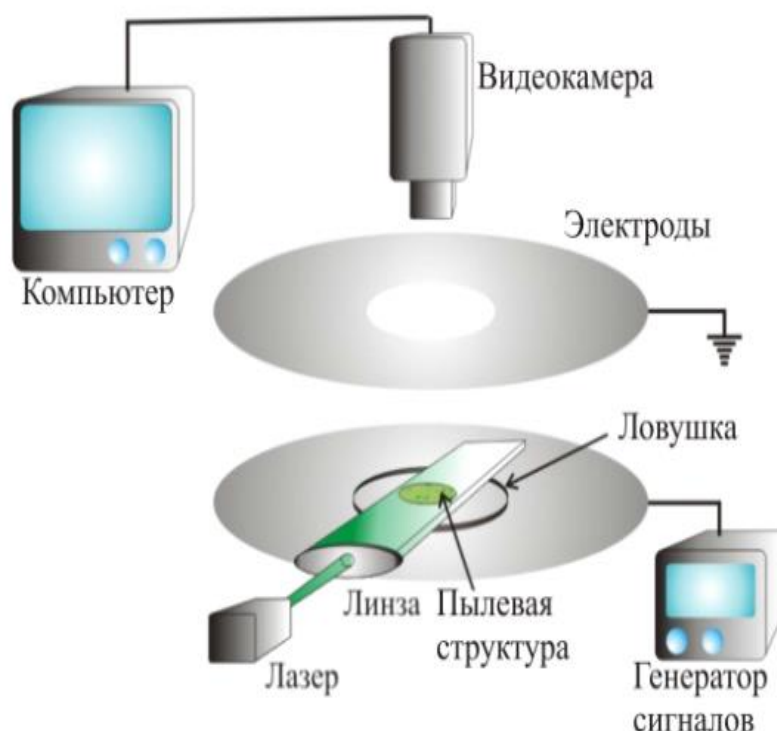


Рисунок 8.4 – Описательная схема работы экспериментальной установки

Исследование структурных свойств пламенно-пылевых образований в емкостном высокочастотном разряде

Экспериментальная установка на основе ВЧ-разряда была использована для выполнения всех экспериментов. Эксперименты проводились в плазме аргона. В качестве частиц пыли использовались полидисперсные частицы Al_2O_3 со средним диаметром $4\text{ }\mu\text{m}$. Регистрация пылевых структур, освещенных горизонтально сфокусированным лазерным лучом (ножом), была реализована с помощью высокоскоростной видео камеры (Fast Video V250). Для эффективности была использована аналоговая черно-белая видеокамера. Изображения с камеры записывались в файл на компьютер с помощью платы видеозахвата компании Pinnacle Systems. Так же для удобства работы стенд был оснащен черно-белым видеомонитором.

В эксперименте при определенных параметрах разряда пылевые частицы левитируют над нижним электродом на границе светящейся плазмы и темного приэлектродного слоя. Левитируя, частицы, формируют упорядоченные структуры, имеющие горизонтальный размер до нескольких см, а толщину - всего несколько слоев частиц. Характерное межчастичное расстояние составляет несколько сотен мкм, что позволяет наблюдать эти структуры практически невооруженным глазом и управлять формой и размером структур, изменяя рельеф нижнего электрода.

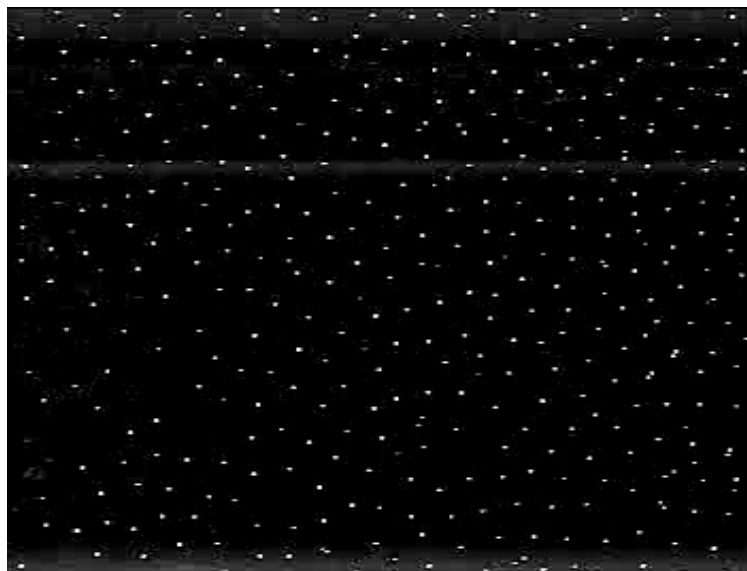


Рисунок 8.5 - Фотоизображение плазменно-пылевых структур образованных в плазме высокочастотного разряда. Давление рабочего газа $p=1$ торр, мощность разряда $P=2$ Вт

Структуры выстраиваются аналогично атомам в кристаллических решетках, т.е. могут иметь кристаллический порядок (рисунок 2.5). На рисунке 2.6 представлено фотоизображение плазменно-пылевой структуры жидкостного типа.



Рисунок 8.6 - Фотоизображение плазменно-пылевых структур, образованных в плазме высокочастотного разряда. Давление рабочего газа $p=0.3$ торр, мощность разряда $P=10$ Вт

Следует отметить, что в лабораторных экспериментах в ВЧ- разряде в наземных условиях реальные трехмерные системы до настоящего времени получить не удалось. Плазменно-пылевые кристаллы в наземных условиях имеют существенно двумерный характер, что напрямую связано с действием силы тяжести.

Целью определения координат и скоростей частиц в плазме является дальнейшее исследование физических свойств пылевой плазмы на основе микроскопических данных, например, определение корреляционной функции распределения частиц. Поэтому важность нахождения координат и скоростей частиц неоспорима.

С этой целью полученные структуры освещались лазерным ножом. Свет, отраженный от частичек, регистрировался с помощью камеры, затем данные записывались на компьютер. После чего эти видеоматериалы с пылевыми частицами обрабатывались. Видеоматериалы разделялись на отдельные кадры и записывались на компьютере с расширением .bmp. Для этого использовалось специальное программное обеспечение VirtualDub v1.5.1. Ниже на рисунке 8.7 представлен интерфейс данной программы во время разделения видео снимков на кадры.

Алгоритм распознавания частиц.

На кадре выбирается пиксель, вокруг которого строятся круг 1 и круг 2. (круг 2 больше круга 1, их радиусы задаются). В круге 1 ищется средняя яркость $F1$, в круге 2 – $F2$. Далее, выбранному пикселю присваивается переменная $p=F2-F1$. Эта процедура выполняется для каждого пикселя на кадре. Задаются параметры p_0, a_1 и a_2 и находятся связанные области пикселей, для которых выполнено условие $p > p_0$. Каждая такая область (пусть ее размер будет a), для которой выполнено условие $a_1 < a < a_2$, идентифицируется как частица. В качестве координат частицы выбираются координаты пикселя внутри области «а».

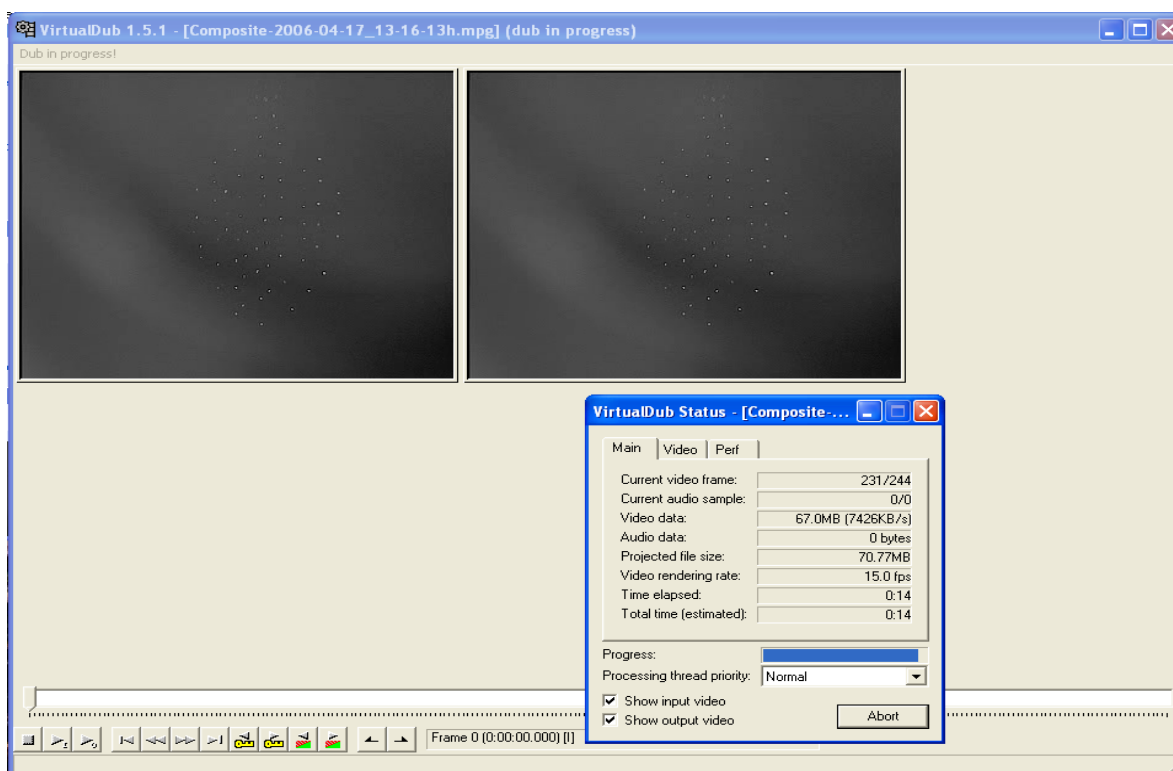


Рисунок 8.7 – Изображения интерфейса программы VirtualDub v1.5.1

Осуществление оптической диагностики

Развитие методов оптико-спектроскопической диагностики плазменно-пылевой среды является важной научной задачей ввиду растущего числа приложений технологий с применением комплексной плазмы в современной микроэлектронике и материаловедении. Важность освоения оптической диагностики заключается в том, что данный метод позволяет получить обширную информацию о параметрах плазмы (температура и концентрация электронов) и достичь углубленного понимания физических процессов в

системе. В отличие от традиционных методов диагностики (например, зондовой), оптическая диагностика является бесконтактной и позволяет с высокой степенью точности определить ряд важных физических параметров, таких как температура и концентрация электронов.

В рамках выполнения диссертации с помощью оптико-спектроскопических методов изучены спектроэнергетические характеристики плазмы высокочастотного емкостного разряда при наличии (комплексная плазма) и в отсутствии (буферная плазма) пылевых частиц в среде в зависимости от рабочих режимов ВЧ.

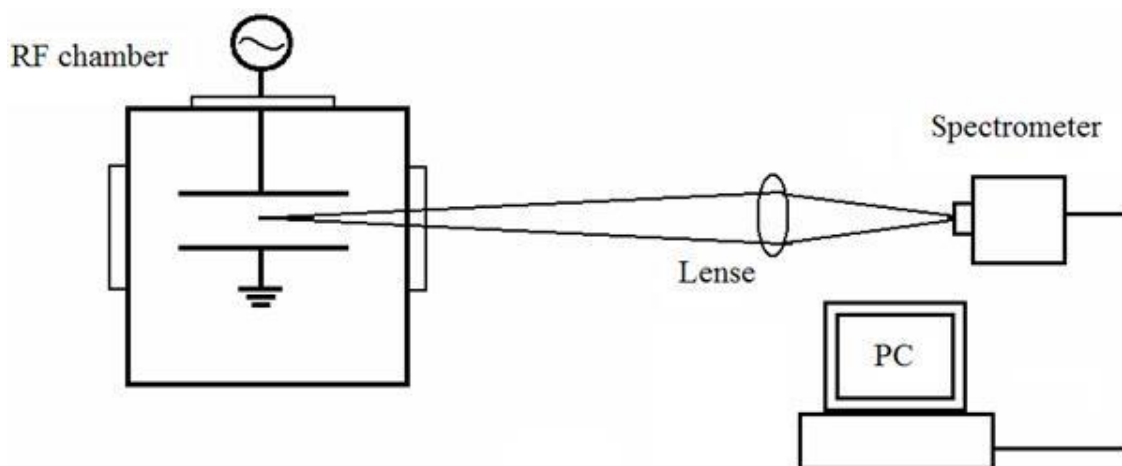


Рисунок 8.8 - Принципиальная схема экспериментальной установки

Принципиальная схема экспериментального стенда по оптико-спектроскопической диагностике плазмы, представляющей собой комбинацию ВЧ установки, описанной в разделе 2.1.1 и оптико-спектроскопической диагностической системы, представлена на рисунке 2.8.

Вакуумная камера имеет боковые оптические окна, через которые ведется наблюдение за процессами, происходящими в разряде. Оптическая система, применяемая для диагностики плазмы, состоит из системы линз и линейного спектрометра Solar S100. Система линз подбирается таким образом, чтобы обеспечить четкое изображение межэлектродного пространства на входной щели спектрометра. Особенность спектрометра Solar S100 - его чувствительность позволяет провести одновременное линейное измерение оптических спектров в диапазоне 190 – 1100 нм.

С помощью оптической системы, состоящей из нескольких линз, на входной щели спектрометра Solar S100 создавалось четкое изображение межэлектродного пространства ВЧ разряда. После зажигания разряда происходил сброс пылевых частиц, которые формировали плазменно-пылевые структуры. В процессе проведения экспериментальной работы были получены спектры буферной плазмы при различных параметрах мощности и давления при наличии частиц и их отсутствии.

Литература

1. Нефедов А.П., Петров О.Ф., Фортов В.Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц. УФН. 1997. Том 167. № 11. С. 1215-1226.
2. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака. УФН. 1997. Том 167. № 1. С. 57-99.
3. Thomas H., Morfill G. e.a. Phys. Rev. Letters. 1994. Vol.73. p. 652.
4. Chu J.H., Lin I. Physica. A. 1994. Vol. 205. P. 183.
5. Allen J. et al. Proc. Ann. Plasma Phys. Conf. (Scotland, Pearth, 1996).
6. Фортов В.Е. и др. Препринт НИЦ ТИВ РАН. М. 127412. 1996.
7. Fortov V.E., Nefedov A.P. Phys. Letters. A. 1996. Vol. 218. P. 89.