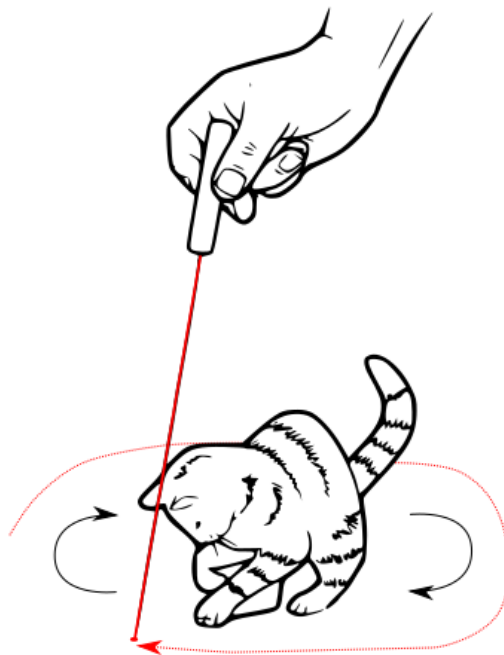


А.В. Иванов, Ю.В. Рождественский

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ
ДЛЯ МИКРОЧАСТИЦ: ЛАБОРАТОРНЫЙ
ПРАКТИКУМ**



**Санкт-Петербург
2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.В. Иванов, Ю.В. Рождественский
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЛОВУШКИ
ДЛЯ МИКРОЧАСТИЦ: ЛАБОРАТОРНЫЙ
ПРАКТИКУМ

ПРАКТИКУМ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО
по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика
в качестве практикума для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Иванов А.В., Рождественский Ю.В., Электродинамические ловушки для микрочастиц: лабораторный практикум– СПб: Университет ИТМО, 2021. – 34 с.

Рецензент(ы):

Федоров Анатолий Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра "Информационные оптические технологии", Университета ИТМО.

Учебное пособие "Электродинамические ловушки для микрочастиц: лабораторный практикум" – вторая часть учебного комплекса «Электродинамические ловушки для микрочастиц». Практикум содержит подробное описание и руководство по выполнению лабораторных работ по локализации, селекции и управлению заряженными микрочастицами в линейных и трёхмерных электродинамических ловушках.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Иванов А.В., Рождественский Ю.В., 2021

Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа №1. Основы безопасности при работе с высоковольтным оборудованием	4
Лабораторная работа №2. Знакомство с интерфейсом лабораторной установки для локализации микрочастиц.....	6
Лабораторная работа №3. Локализация микрочастиц в радиочастотной ловушке	10
Лабораторная работа №4. Оценка эффективности локализации микрочастиц различного рода.....	15
Лабораторная работа №5. Применение методов технического зрения для контроля положения микрочастиц в электродинамической ловушке..	17
Лабораторная работа №6. Оценка размеров микрочастиц при инъекции в линейную электродинамическую ловушку.....	20
Лабораторная работа №7. Селекция микрочастиц в электродинамической ловушке.....	23
Лабораторная работа № 8. Расширенные орбиты в электродинамических ловушках.....	25
ЛИТЕРАТУРА.....	29

Введение

«Электродинамические ловушки для микрочастиц: лабораторный практикум» – вторая часть учебного комплекса «Электродинамические ловушки для микрочастиц». Настоящий лабораторный практикум предлагает выполнение ряда экспериментальных исследований по локализации заряженных микрочастиц с помощью «Электродинамической ловушки для микрочастиц учебной (ЭДЛ-У)» (Рисунок 1).



Рисунок 1. ЭДЛ-У 2D 45-D0-01/00

Лабораторный курс направлен на приобретение обучающимися практических навыков по исследованию микрочастиц в электродинамических ловушках и формированию экспериментально-исследовательской компетенции в рамках магистерской программы «Физика и технология наноструктур» по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика.

Лабораторная работа №1. Основы безопасности при работе с высоковольтным оборудованием

Цель работы

Проведение техники безопасности работы с высоковольтным оборудованием перед началом работы.

Теоретические сведения

Перед началом работ в электроустановках в целях безопасности необходимо проводить организационные и технические мероприятия.

К организационным мероприятиям в случае выполнения лабораторной работы относят допуск к работе, надзор во время работы, оформление перерывов в работе.

Допуск к выполнению лабораторной работы осуществляется после проведения инструктажа техники безопасности и усвоения теоретического минимума в рамках предложенной работы. Измерительный лист дважды подписывается ответственным лицом: после оформления допуска к лабораторной работе и по результатам произведённых измерений.

Выполнение лабораторной работы может осуществляться только в группах не менее чем из двух человек – производителя работ и ассистентом. Производитель работ выполняет основные манипуляции с лабораторной установкой, ассистент регистрирует результаты в листе измерений. При большом объёме работы роли исполнителей могут меняться.

Согласно ТОО Р-45-007-94, необходимо выполнить следующие требования перед началом работы:

- Изучить инструкцию по эксплуатации, описания, схемы, необходимые для выполнения работы, порядок выполнения работы.
- Надеть спецодежду и застегнуть так, чтобы не было свисающих концов, рукава опустить и застегнуть у кистей рук. Волосы заправить под головной убор.
- Проверить исправность, отсутствие повреждений средств индивидуальной защиты путем внешнего осмотра, очистить и обтереть их от пыли. По штампу проверить срок годности.
- Убедиться в исправности средств пожаротушения.

Выполнить организационно-технические мероприятия, обеспечивающие безопасность работ:

- оформить допуск на производство работ, определяющий место работы, начало и окончание работы, условия ее безопасного выполнения, состав бригады и лиц, ответственных за безопасность проведения работ;
- произвести отключение оборудования и принять меры, препятствующие подаче напряжения к месту проведения работ;
- вывесить плакат (на приводах, рубильнике) "Не включать - работают люди";
- присоединить к «земле» переносное заземление, проверить отсутствие напряжения на токоведущих частях (предварительно проверенным прибором), на которые нужно наложить заземление и вывесить плакат «Заземлено»;
- заземлить антенный фидер для исключения возможности попадания высокочастотного напряжения в оборудование со стороны антенны или антенного коммутатора;

- оградить место проведения работ и вывесить плакаты «Работать здесь», «Испытание».

Требования безопасности во время работы:

- Выполнять только ту работу, которая поручена и по которой проведен инструктаж на рабочем месте.
- Не отвлекаться и не отвлекать товарищей по работе.
- Пользоваться только сухими и чистыми изолирующими средствами защиты.

Задания для самоконтроля

1. Перечислите организационные мероприятия перед началом работы согласно ТОО Р-45-007-94.
2. Перечислите требования безопасности во время работы.
3. Определите расположение электрощита и средств пожаротушения в лаборатории.
4. Приведите порядок использования порошковых огнетушителей (ОП), углекислотных огнетушителей (ОУ) и воздушно-пенных огнетушителей (ОВП).
5. Каким из перечисленных выше типов огнетушителей можно пользоваться при возникновении пожара на высоковольтном оборудовании (до 4,5 кВ)?

Лабораторная работа №2. Знакомство с интерфейсом лабораторной установки для локализации микрочастиц

Цель работы

Знакомство с возможностями лабораторной установки для локализации микрочастиц при нормальных условиях

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 3500 В.

Теоретические сведения

Электродинамическая ловушка – устройство для длительной устойчивой локализации (захвата) заряженных частиц в ограниченной области пространства с помощью переменных электрических полей. В зависимости от характера частиц различают ионные ловушки для

локализации ионов и элементарных частиц в вакууме при давлении 10^{-3} тор, радиочастотные ловушки для локализации частиц с характерным размером 1 – 100 нм при давлении 10^{-2} тор и ловушки для микрочастиц, позволяющие локализовать заряженные объекты с характерным размером 100 нм – 100 мкм при атмосферном давлении. Электродинамическая ловушка для микрочастиц представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1. Электродинамическая ловушка для локализации микрочастиц.

Лабораторная установка для локализации заряженных микрочастиц – сложное техническое устройство, обеспечивающее инъекцию, ионизацию и устойчивую локализацию заряженных микрочастиц при нормальных условиях. Основными компонентами лабораторной установки являются:

- 1) Электродинамическая ловушка
- 2) Система ионизации микрочастиц
- 3) Система инъекции микрочастиц
- 4) Система регистрации и обработки сигналов

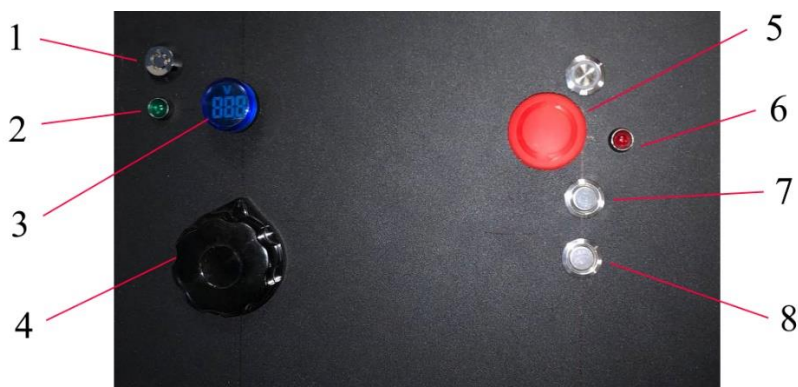


Рисунок 2.2. Интерфейс передней панели лабораторной установки для локализации заряженных микрочастиц. Цифрами отмечены: 1) – ключ питания, 2) – индикатор питания, 3) – вольтметр лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), 4) – регулятор напряжения ЛАТРа, 5) – кнопка экстренного отключения питания, 6) – индикатор замка кюветы с микрочастицами, 7) – напуск воздуха в систему инъекции, 8) – запуск микрочастиц в рабочую область ловушки.

Управление элементами установки осуществляется с помощью интерфейса передней панели. Основные элементы интерфейса передней панели приведены на Рисунке 2.2.

Цифрами на Рисунке 2.2 обозначены: 1) – ключ питания, 2) – индикатор питания, 3) – вольтметр лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), 4) – регулятор напряжения ЛАТРа, 5) – кнопка экстренного отключения питания, 6) – индикатор замка кюветы с микрочастицами, 7) – напуск воздуха в систему инъекции, 8) – запуск микрочастиц в рабочую область ловушки.

Цикл работы установки состоит из следующих шагов:

- 1) Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания (2) и замка кюветы с микрочастицами (6) не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре (3) не отображается.
- 2) Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
- 3) Повернуть ключ питания (1). Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
- 4) Увеличить напряжение на ЛАТРе.
- 5) Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7).
- 6) Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8).
- 7) Провести необходимые измерения.
- 8) После проведения необходимых измерений выставить значение 0 на ЛАТРе.
- 9) Повернуть ключ питания и обесточить установку.

Видеоинтерфейс лабораторной установки позволяет захватывать изображение рабочей области ловушки и отслеживать положение микрочастиц в реальном времени. Пример успешной локализации микрочастиц крахмала, формирующих кулоновскую структуру, представлен на рисунке 2.3.

Цифрами на рисунке 2.3 обозначены: 1) – изображение с устройства видеозахвата, 2) – режимы работы: цветной в режиме отдельных снимков (RGB/Single), бинаризованное изображение в режиме отдельных снимков (Binarize/Single), режим потока (Stream), 3) – скорость съёмки, 4) – регулировка увеличения, 5) – амплитуда переменного напряжения на электродах, В, 6) – частота переменного напряжения, Гц, 7) – экспорт изображения/потока, 8) – захват кадра/потока.

Изменение режима работы позволяет захватывать как одиночные изображения в формате RGB/двухцветном режиме, так и поток данных. Скорость съёмки может быть выставлена 20/50/100/150/200 Hz.

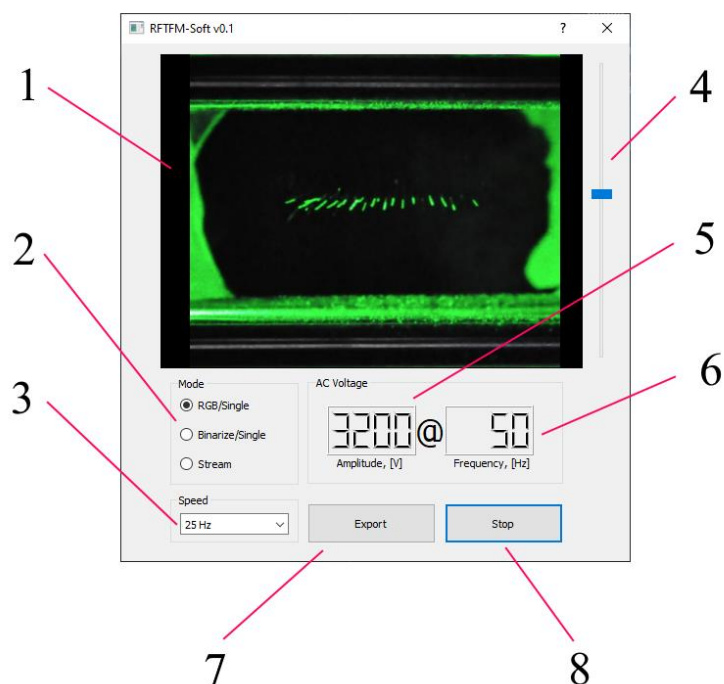


Рисунок 1.3. Графический интерфейс ПО для работы с лабораторной установкой для локализации микрочастиц (конфигурация с линейной квадрупольной ловушкой).

Запуск программного обеспечения предложит провести программу самотестирования. В случае возникновения неполадок программу самотестирования необходимо выполнить повторно, нажав «?» в правом верхнем углу графического интерфейса.

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента, необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Запустить программное обеспечение и программу самотестирования.

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим RGB/Single, 25 Hz.

5. Выставить значение напряжения на электродах 3200 В.
6. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
7. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
8. Нажать “Stop” в графическом интерфейсе программы.
9. Экспортировать полученное изображение в файл с именем “Lab1_25Hz”.
10. Нажать “Start” в графическом интерфейсе программы.
11. Выставить скорость съёмки 50 Нз. Повторить Пункты 6-7, экспортировать полученное изображение в файл с именем “Lab1_50Hz”.
12. Выполнить пункт 9 для скорости 100, 150, 200 Гц.
13. Обесточить установку.

Сравнить полученные изображения.

Содержание отчёта

1. Цель работы
2. Пошаговый ход выполнения работы
3. Изображения Lab1_25Hz, Lab1_50Hz, Lab1_100Hz, Lab1_150Hz, Lab1_200Hz.
4. Сравнение полученных изображений и вывод.

Задания для самоконтроля

1. Что такое электродинамическая ловушка?
2. Назовите основные элементы лабораторной установки для локализации заряженных микрочастиц.
3. Назовите цикл работы лабораторной установки.
4. Почему траектории микрочастиц на изображении Lab1_25Hz обладают ярко выраженным следом?
5. По имеющимся данным оцените максимальную частоту колебаний микрочастиц.

Лабораторная работа №3. Локализация микрочастиц в радиочастотной ловушке

Цель работы

Овладение базовым функционалом радиочастотной ловушки для локализации микрочастиц при нормальных условиях. Ознакомление с основными характеристиками радиочастотной ловушки. Определение оптимальных условий локализации микросфер боросиликатного стекла.

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 3500 В (2D или 3D конфигурация).

Теоретические сведения

В основе работы электродинамических ловушек лежит взаимодействие заряженных частиц с переменным электрическим полем, формирующимся вокруг системы проводников заданной формы. Представим себе концентрический конденсатор, состоящий из двух вложенных цилиндров бесконечной длины. На один из цилиндров подано напряжение $+V$, а на другой $-V$. Тогда частица с зарядом $q+$ будет притягиваться к пластине $-V$ (Рисунок 3.1). А теперь вместо постоянного напряжения $\pm V$, зададим переменное напряжение $\pm V \cos \omega t$.

В таком случае, половину периода частица $q+$ будет притягиваться к одной цилиндрической поверхности, а вторую половину периода – к другой. При достаточно большой частоте и амплитуде переменного напряжения положительно заряженная частица $q+$ будет совершать колебания с конечной амплитудой между обкладками конденсатора.

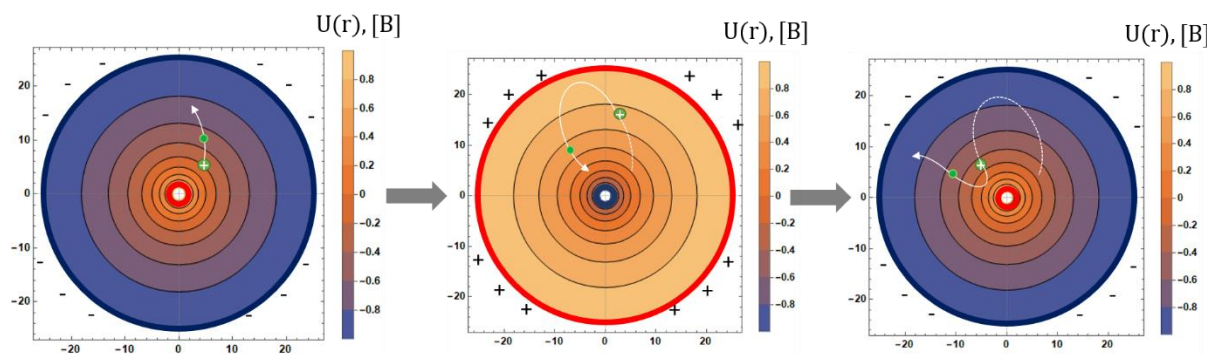
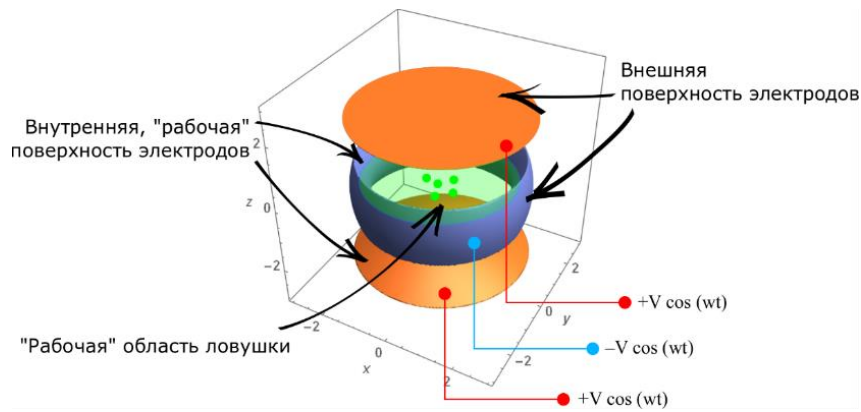
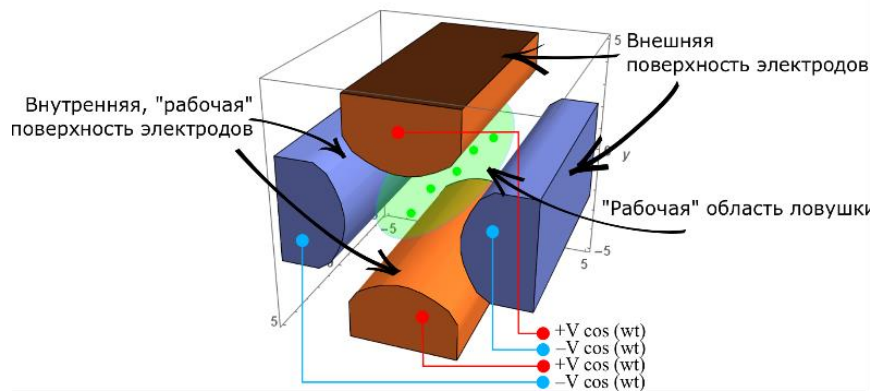


Рисунок 3.1 Схематичное изображение квадрупольной линейной ловушки как системы двух концентрических поверхностей.

Заряженные цилиндрические поверхности на Рисунке 3.1 носят название электроды ловушки. Форма (как и материал) электродов может быть совершенно разной: это зависит от области применения ловушки и типа локализуемых частиц. Например, для одиночных ионов размеры электродов не превышают нескольких миллиметров, а в ловушках для массивных микрочастиц счёт идет уже на сантиметры, а иногда – на десятки сантиметров.



(a)



(б)

Рисунок 3.2. Составные элементы трёхмерной ловушки Пауля (а) и линейной квадрупольной ловушки (б).

Пространство между электродами, в котором осуществляется захват частиц, называется рабочей областью ловушки. На Рисунке 3.2 приведена трёхмерная конфигурация электродинамической ловушки с тремя электродами (ловушка Пауля).

При попытке локализации микрочастиц в условиях атмосферы микрочастицы могут ионизироваться о воздух. В результате заряженные частицы, пролетая через рабочую область ловушки, захватываются.

Рабочие поверхности ловушки Пауля на Рисунке 3.2а образованы однополостным и двуполостным гиперболами вращения (синий и оранжевые электроды соответственно). Пространственное распределение потенциала в таком случае примет вид

$$V(x, y, z) = \frac{V_0 \cos \omega t}{r_0^2 + 2z_0^2} (x^2 + y^2 - 2z^2), \quad (3.1)$$

где V_0 – напряжение на электродах, ω – частота переменного напряжения, r_0 – внутренний радиус тороидального электрода, z_0 – расстояние между поверхностями запирающих электродов.

Уравнения движения частицы с зарядом e и массой m в вакууме примут вид

$$m\ddot{x} = -\frac{2eV_0 \cos \omega t}{r_0^2 + 2z_0^2}(x), \quad m\ddot{y} = -\frac{2eV_0 \cos \omega t}{r_0^2 + 2z_0^2}(y), \quad m\ddot{z} = \frac{4eV_0 \cos \omega t}{r_0^2 + 2z_0^2}(z).$$

Уравнения движения выше – линейные дифференциальные уравнения с переменными коэффициентами. В зависимости от параметров системы, таких как геометрические размеры ловушки, параметры питания, так же от характеристик самой частицы (заряд, масса), траектория может быть как ограничена рабочей областью ловушки – в таком случае наблюдается локализация — так и экспоненциально расти и оседать на электродах ловушке.

Глубина потенциальной ямы (эффективный потенциал) обеспечивающей локализацию частицы определяется в виде

$$\Phi = \frac{4e^2V_0^2}{m\omega^2(r_0^2 + 2z_0^2)^2}(R^2 + 4z^2), \quad (3.2)$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2}$. Таким образом, при локализации мелкодисперсных частиц эффективность локализации пропорциональна амплитуде переменного напряжения на электродах.

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Запустить программное обеспечение и программу самотестирования.

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим RGB/Single, 50 Hz.
5. Выставить значение напряжение на электродах 0 V.
6. Увеличить напряжение V до 2500 В.
7. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
8. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
9. Нажать “Stop” в графическом интерфейсе программы.
10. Записать в лист измерений параметр V и количество локализованных частиц N при заданном напряжении.

11. Нажать “Start” в графическом интерфейсе программы.
12. Сбросить значения переменного напряжений до нуля.
13. Обесточить установку.
14. Повторить пункты 1–13 в количестве $k=10$ раз для заданного напряжения V .
15. Повторять шаги 1–14 для $V=400, 600, 1000, 1500, 2000$ В.
16. Обесточить установку.

Обработка результатов

Среднее значение количества частиц N для заданного напряжения V можно определить в виде

$$\overline{N}_V = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i, \quad (3.3)$$

где k – количество измерений. Тогда среднее квадратичное отклонение N примет вид

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (N_i - \overline{N}_V)^2}. \quad (3.4)$$

Значение погрешности для $f = k - 1$ степеней свободы определяется в виде

$$\delta \overline{N}_V = t_{\gamma, f} S_0, \quad (3.5)$$

где $t_{\gamma, f}$ – коэффициент Стьюдента при доверительной вероятности γ . Таким образом, оптимальное напряжение V характеризуется наибольшим значением $\overline{N}_V \pm \delta \overline{N}_V$.

Содержание отчёта

1. Цель работы
2. Пошаговый ход выполнения работы
3. Подписанный лист измерений
4. Оценка оптимального значения напряжения с графиком зависимости среднего значения количества микрочастиц \overline{N}_V
5. Анализ результатов и вывод

Задания для самоконтроля

1. Что такое электродинамическая ловушка?
2. Назовите основные элементы электродинамической ловушки на примере ловушки Пауля.
3. Опишите принцип локализации заряженных частиц в ионных ловушках.
4. В чём принципиальное отличие ионной ловушки, радиочастотной ловушки и ловушки для микрочастиц?

5. Как соотносятся глубина потенциальной ямы в ионной ловушке, радиочастотной ловушке и ловушке для микрочастиц?

Лабораторная работа №4. Оценка эффективности локализации микрочастиц различного рода

Цель работы

Качественная оценка эффективности локализации микрочастиц различного рода.

Методические указания

В качестве объекта локализации могут выступать микрочастицы с характерным размером 0,5–150 мкм: к таким объектам могут относиться большинство бытовых сыпучих материалов, например, мука, крахмал, дрожжи, кристаллы пищевой соли помола 0, а также частицы пыли, споры грибов, и др.

При этом различные частицы обладают различной способностью к ионизации трением о воздух; таким образом, эффективность локализации при одних и тех же параметрах ловушки для различных частиц может быть совершенно разной.

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Запустить программное обеспечение и программу самотестирования.

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц из кюветы 1. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим RGB/Single, 50 Hz.
5. Выставить значение напряжение на электродах 0 В.
6. Увеличить напряжение V до 2500 В.
7. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.

8. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
9. Нажать “Stop” в графическом интерфейсе программы.
10. Записать в лист измерений параметр V и количество локализованных частиц из кюветы 1.
11. Нажать “Start” в графическом интерфейсе программы.
12. Сбросить значения переменного напряжений до нуля.
13. Обесточить установку.
14. Повторить пункты 1–13 в количестве $k=10$ раз для заданного напряжения V .
15. Повторять шаги 1–14 для $V=2500, 3000, 3500$ В.
16. Обесточить установку.

Аналогично провести измерение количества локализованных частиц для кюветы 2 и 3. Подписать лист измерений.

Обработка результатов

Эффективность локализации можно оценить по среднему значению захваченных микрочастиц различного рода при заданных параметрах напряжения. Обработка результатов производится аналогично Лабораторной работе 3. Необходимо оценить среднее значение количества частиц N каждого промежуточного значения $V=2500, 3000, 3500$ В – для каждой кюветы.

Содержание отчёта

1. Цель работы
2. Пошаговый ход выполнения работы
3. Подписанный лист измерений
4. Оценка среднего числа микрочастиц, локализованных из кюветы 1, 2, 3 для напряжения 2500, 3000, 3500 В. График зависимости среднего значения количества микрочастиц N_V при соответствующих параметрах установки.
5. Анализ результатов и вывод.

Задания для самоконтроля

1. Что такое электродинамическая ловушка?
2. Назовите основные элементы электродинамической ловушки на примере ловушки Пауля.
3. Опишите принцип локализации заряженных частиц в ионных ловушках.
4. В чём принципиальное отличие ионной ловушки, радиочастотной ловушки и ловушки для микрочастиц?

5. Как соотносятся глубина потенциальной ямы в ионной ловушке, радиочастотной ловушке и ловушке для микрочастиц?

Лабораторная работа №5. Применение методов технического зрения для контроля положения микрочастиц в электродинамической ловушке

Цель работы

Определение максимума плотности распределения заряженных частиц в рабочей области ловушки с помощью методов технического зрения в программной среде Wolfram Mathematica

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 3500 В (2D или 3D конфигурация). Обработка результатов осуществляется в программной среде Wolfram Mathematica версии 11.0 и выше.

Теоретические сведения

При проведении локализации микрочастиц в атмосфере выходными данными являются изображения с видеоинтерфейса лабораторной установки. При большом количестве локализованных частиц, а также большом количестве экспериментальных данных ручной контроль положения микрочастиц в электродинамической ловушке не представляется возможным. В таком случае для анализа экспериментальных данных необходимо применять методы технического зрения.

Компьютерное (техническое) зрение – теория и технология создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов.

Одним из простейших методов анализа положения микрочастиц в линейной ловушке может являться анализ аксиальной проекции изображения рабочей области.

Проекцией изображения на некоторую ось называется сумма интенсивностей пикселей изображения в направлении, перпендикулярном данной оси. Простейшим случаем проекции двумерного изображения являются вертикальная проекция на ось oz (ось линейной ловушки, см. Рисунок 1.2), представляющая собой сумму интенсивностей пикселей по столбцам изображения:

$$ProjZ(y) = \sum_{y=0}^{dimY-1} I(x, y), \quad (5.1)$$

где I – интенсивность изображения в точке (x, y) .

Таким образом, существование экстремумов функции $Z(y)$ обозначает положение микрочастицы в текущих координатах.

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Запустить программное обеспечение и программу самотестирования. Выставить режим «Binarize/Single». На Рисунке 5.1. представлен результат захвата в «RGB» и бинаризованном режимах работы.



Рисунок 5.1 RGB (справа) и бинаризованный (слева) режимы визуализации

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим Binarize/Single, 100 Hz.
5. Выставить значение напряжение на электродах 1900 В.
6. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
7. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
8. Нажать “Stop” в графическом интерфейсе программы.
9. Экспортировать полученное изображение в файл с именем “Lab5_100Hz_1900”.
10. Нажать “Start” в графическом интерфейсе программы.

11. Сбросить значения переменного напряжений до нуля.
12. Обесточить установку.
13. Повторить пункты 1–12 для $V = 1900, 2000, 2200$ В.
14. Обесточить установку.

Обработка результатов

Обработка результатов осуществляется в программной среде Wolfram Mathematica 11.0 или более поздних версиях.

На первом шаге обработки результатов производим импорт изображения командой `Import`:

`ImageBin=Import["\<>path<>\ Lab5_100Hz_1900.png"]`

где значение 1 соответствует засвеченному пикселю, 0 – тёмному. Количество засвеченных точек в столбцах можно подсчитать как

`IDTotal = Total[#] & /@ Transpose[ID]`

Без операции транспонирования будет производиться подсчёт засвеченных точек в ряду, вместо столбца. В результате максимум функции будет соответствовать положению частицы на изображении. Построение графика осуществляется с помощью `ListPlot`

`ListPlot[Total[#] & /@ Transpose[ID], Joined -> True, DataRange -> {0, 10}]`

Здесь `DataRange` соответствует длине ловушки в 10 см. Пример графика приведён ниже.

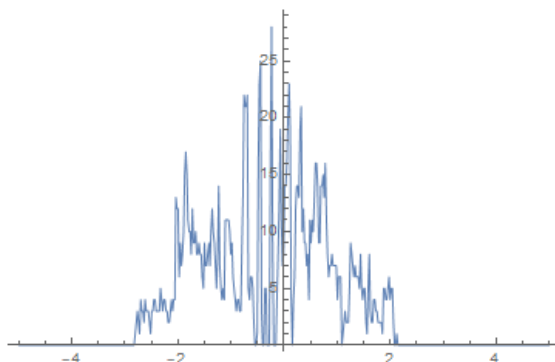


Рисунок 5.2. Результат обработки экспериментальных данных

Содержание отчёта

1. Цель работы
2. Пошаговый ход выполнения работы
3. Листинг определение пиков интенсивности методами машинного зрения в программной среде Wolfram
4. Анализ результатов и вывод

Задания для самоконтроля

1. Что такое машинное (компьютерное) зрение?
2. Что такое проекция изображения на ось?
3. Что представляет собой операция бинаризации изображения?

4. Как производится операция транспонирования?
5. Как определяется пространственное положение частицы на гистограмме проекции?

Лабораторная работа №6. Оценка размеров микрочастиц при инъекции в линейную электродинамическую ловушку.

Цель работы

Определение размера микрочастиц при инъекции в линейную электродинамическую ловушку.

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 3500 В (2D или 3D конфигурация). Скорость камеры в лабораторной установке должна быть не менее 60 кадров/секунду.

Теоретические сведения

Система инъекции – компонента лабораторной установки для локализации микрочастиц, отвечающая за доставку микрочастиц в рабочую область ловушки. Схематическое изображение системы инъекции представлено на Рисунке 6.1.

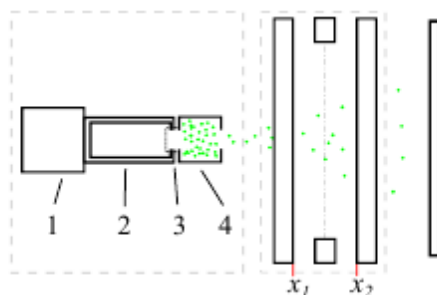


Рисунок 6.1 Принципиальная схема инъекции микрочастиц в рабочую область ловушки: (1) - насос, (2) - воздушная камера, (3) - клапан, (4) - кювета с микрочастицами.

Инъекция осуществляется следующим образом: с помощью насоса (1) создается избыточное давление в воздушной камере (2) (однократное нажатие кнопки (7), Рисунок 2.2). После этого производится открытие клапана (3) (однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2). В результате поток воздуха впрыскивает частицы из кюветы (4) в рабочую область ловушки. Частицы с соотношением заряда к массе, удовлетворяющим (1.2), локализируются, прочие частицы оседают на экране. При этом, если ловушка выключена, уравнение движения вдоль оси ox примут вид

$$m\ddot{x} = -\gamma\dot{x}, \quad (6.1)$$

или, в результате подстановки постоянных,

$$\ddot{x} = -\frac{9\mu}{2\rho r^2}\dot{x}. \quad (6.2)$$

Переходя к системе двух ОДУ, аналитическое решение принимает вид

$$x(t) = \frac{2 \exp\left(\frac{-9\mu t}{2r^2\rho}\right) \left(\exp\left(\frac{-9\mu t}{2r^2\rho}\right) - 1\right) r^2 \rho x_0}{9\mu} + p_0, \quad (6.3)$$

где x_0 и p_0 – начальная координата и скорость, соответственно. Тогда в момент времени t_1 положение частицы соответствует координате электрода x_1 (Рисунок 6.1), и в момент времени $t_2 = t_1 + \delta t$ пересечения второго электрода в координате x_2 , значения мгновенных скоростей p_1 и p_2 примут вид

$$p_1 = \exp\left(-\frac{9\mu t_1}{2r^2\rho}\right) p_0, \quad (6.4)$$

$$p_2 = \exp\left(-\frac{9\mu(t_1 + \delta t)}{2r^2\rho}\right) p_0, \quad (6.5)$$

Тогда, отношения мгновенных скоростей примут окончательный вид

$$p_1/p_2 = \exp\left(\frac{9\delta\mu}{2r^2\rho}\right). \quad (6.6)$$

Таким образом, при $p_1/p_2 > 0$ наблюдается замедление частицы – и данное условие выполняется при любых значениях аргумента экспоненциальной функции правой части (6.6). При известных мгновенных скоростях p_1 и p_2 , а также плотности грубодисперсной взвеси можно определить распределение частиц по размерам.

При осуществлении захвата изображения с одинаковой выдержкой мгновенная скорость частицы пропорциональна соответствующему следу (Рисунок 6.2)

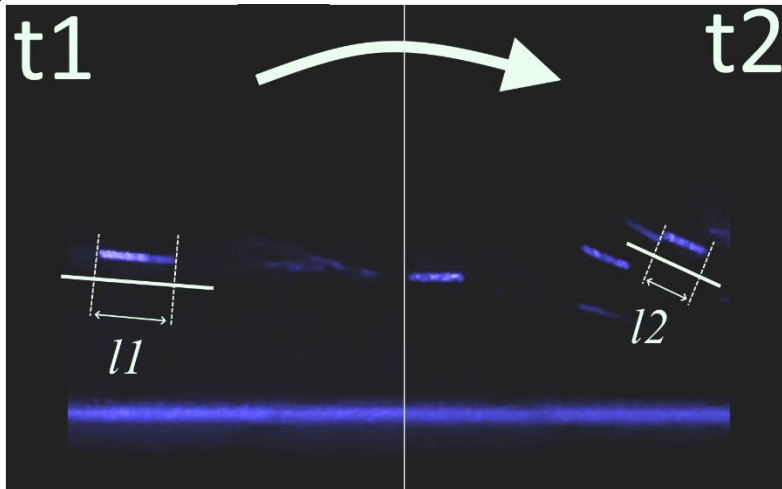


Рисунок 6.2. Анализ следов (треков) микрочастиц в режиме видеозахвата

Таким образом, отношение p_1/p_2 можно заменить на отношение длин следа частицы в момент t_1 и $t_2 - l_1$ и l_2 соответственно. Тогда радиус частиц можно выразить в окончательном виде:

$$r = \sqrt{\frac{9\delta\mu}{2\rho \log l_1/l_2}}. \quad (6.7)$$

План проведения лабораторной работы

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрывать кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим Stream, 200 Hz.
5. Выставить значение напряжение на электродах 0 В.
6. Нажать “Start” в графическом интерфейсе программы.
7. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
8. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
9. Нажать “Stop”. Окно экспорта откроется автоматически.
10. Обесточить установку.
11. Повторить пункты 1–10 в количестве $k=10$ раз.
12. Обесточить установку.

Обработка результатов

Произвести измерение l_1 и l_2 для 10 произвольных частиц на каждой i итерации инъекции для $k = 10$ итераций. Время пролёта δ определяется как произведение количества кадров на величину выдержки. Для 200 кадров/секунду имеем

$$\delta = \frac{1}{200} Fr,$$

где Fr – количество кадров между измерениями l_1 и l_2 .

Определить среднее значение размера частицы с помощью формулы (3.3) из Лабораторной работы 3. Рассчитать среднее квадратичное отклонение размеров частицы по формулам (3.4) – (3.5) из Лабораторной работы 3 и формуле (6.7), а также форму погрешности для косвенных измерений. Сравнить получившийся результат с входными данными.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Пошаговый ход выполнения работы.
3. Лист измерений l_1 , l_2 и δ для 100 частиц.
4. Расчёт среднего размера микрочастиц и величины среднего квадратичного отклонения.
5. Анализ результатов и вывод.

Задания для самоконтроля

1. Объясните принцип инъекции микрочастиц в лабораторной установке.
2. На каком этапе инъекции осуществляется ионизация микрочастиц?
3. Как связано замедление частиц в результате трения о воздух с размером микрочастицы?
4. Как производится расчет погрешности косвенного измерения?

Лабораторная работа №7. Селекция микрочастиц в электродинамической ловушке

Цель работы

Произвести селекцию микрочастиц в электродинамической ловушке.

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 3500 В (2D или 3D конфигурация). Скорость камеры в лабораторной установке должна быть не менее 60 кадров/секунду.

Теоретические сведения

Локализация микрочастиц в ловушке наблюдается только в том случае, когда сила тяжести компенсируется возвращающей силой со стороны ловушки. Таким образом, необходимо, чтобы сила со стороны ловушки F_z соответствовала

$$F_z(z) = mg - \rho g v, \quad (7.1)$$

где v – объём частицы. В ловушке Пауля сила, действующая на частицу вертикально, является линейной, т.е. зависит от координаты в первой степени в виде

$$F_z(z) = \frac{4e^2 V^2}{m\Omega^2 r_0^4} z, \quad (7.2)$$

аналогично силе упругости в законе Гука. Таким образом, чем дальше частица от центра ловушки – тем сильнее сила действует на частицу. При этом координата z не может быть больше r_0 , потому что сила F_z не

распространяется за пределы ловушки. Следовательно, максимальная сила будет $F_z(z) = F(r_0)$, а условие локализации примет вид

$$\frac{4e^2V^2}{m\Omega^2r_0^3} \geq mg - \rho g v. \quad (7.3)$$

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Запустить программное обеспечение и программу самотестирования. Выставить режим «бинаризованное (двухцветное) изображение».

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим Binarize/Single, 50 Hz.
5. Увеличить переменное напряжение до $V=2200$ В
6. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
7. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
8. Уменьшать напряжение с шагом 100 В до тех пор, пока в ловушке не останется единственная частица.
9. Плавно уменьшать напряжение до тех пор, пока последняя частица не делокализуется. Записать заданное напряжение $V = V_l$
10. Сбросить значения переменного напряжений до нуля.
11. Обесточить ловушку.
12. Повторить пункты 1–11 в количестве $k=10$ раз.
13. Обесточить ловушку.
14. Подписать лист измерений.

Обработка результатов

Зная минимальное значение амплитуды переменного напряжения, при котором наблюдалась дестабилизация частицы, и частоту, можно оценить соотношение заряда к массе. Критический порог глубины потенциальной

ямы для осуществления локализации представлен в виде (силой Архимеда пренебрегаем)

$$\frac{4e^2V^2}{m\Omega^2r_0^3} \approx mg. \quad (7.4)$$

Тогда отношение заряда к массе можно оценить как

$$\frac{e}{m} \approx \sqrt{\frac{g\Omega^2r_0^3}{4V_t^2}}, \quad (7.5)$$

где r_0 – радиус ловушки, Ω – частота переменного напряжения. Используя (3.3) – (3.5) можно определить среднее значение e/m и дисперсию.

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Пошаговый ход выполнения работы.
3. Подписанный лист измерений.
4. Расчёт среднего значения e/m .
5. Анализ результатов и вывод.

Задания для самоконтроля

1. Объясните принцип селекции микрочастиц при локализации в атмосфере.
2. Как связана амплитуда и частота переменного напряжения с глубиной потенциальной ямы, обуславливающей локализацию микрочастицы в ловушке?
3. Объясните уменьшение количества частиц с уменьшением амплитуды переменного напряжения.

Лабораторная работа № 8. Расширенные орбиты в электродинамических ловушках

Цель работы

Определение условий возникновения расширенных орбит в электродинамических ловушках.

Методические указания

Для успешного выполнения лабораторной работы необходима модель лабораторного комплекса с возможностью повышения амплитуды переменного напряжения до 4500 В.

Теоретические сведения

Локализация заряженных объектов в среде сопровождается возникновением сил трения, направленных против вектора скорости

объекта. Число Рейнольдса характеризует отношение инерциальных сил к силам трения в вязких газах:

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (8.1)$$

где ρ – плотность среды, η – динамическая вязкость среды, v – модуль скорости частицы, D – гидродинамический диаметр частицы. Таким образом, число Рейнольдса пропорционально модулю скорости и гидродинамическому диаметру объекта, в случае субмикронных частиц гидродинамический радиус приближенно равен физическому диаметру частицы. Критическое значение числа Рейнольдса, определяющее переход от ламинарного движения к турбулентному, для микрочастицы в воздушной атмосфере при нормальных условиях составляет порядка единицы. Для фиксированных значений среды и диаметра объекта число Рейнольдса определяется только модулем скорости. При малых амплитудах удерживающего поля локализованная частица развивает скорости, при которых значения числа Рейнольдса меньше единицы. В таком случае для описания динамики объекта в условиях диссипации применяется модель линейного трения.

При более высоких амплитудах удерживающего поля скорость движения частицы выше, число Рейнольдса может превышать критическое значение. Движение частицы принимает турбулентный характер, и в таком случае для описания динамики объекта в условиях вязкой среды модели линейного трения уже недостаточно. Необходим учёт дополнительной силы трения, пропорциональной квадрату скорости частицы. Так, полная сила трения D в приближении Озеена даётся как

$$D = D_s(1 + 3/16Re), \quad (8.2)$$

где D_s – стоксова сила трения, Re – число Рейнольдса. В результате при больших скоростях наблюдается формирование расширенных орбит – замкнутых траекторий, обусловленных удвоением периода колебаний в плоскости xu . Характерная форма расширенных орбит представлена на Рисунке 8.1.

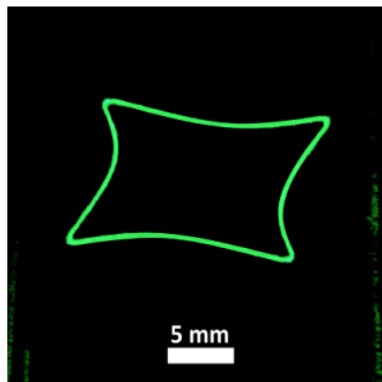


Рисунок 8.1. Расширенные орбиты в электродинамических ловушках

Увеличение скорости в электродинамических ловушках может быть сопряжено с ростом глубины потенциальной ямы. Таким образом, формирование расширенных орбит должно наблюдаться при значительном увеличении амплитуды переменного напряжения на электродах ловушки.

План проведения лабораторной работы

Перед началом непосредственно эксперимента, необходимо провести подготовительный этап. В первую очередь необходимо освободить рабочее пространство и приготовить средства защиты при работе с высоковольтным оборудованием и лазерным излучением. Выставить режим «RGB». Запустить программное обеспечение и программу самотестирования.

1. Удостовериться, что установка обесточена – индикаторы питания и замка кюветы с микрочастицами не горят. Значение амплитуды переменного напряжения на вольтметре не отображается.
2. Открыть кювету с микрочастицами, загрузить образцы микрочастиц для локализации. Закрыть кювету.
3. Повернуть ключ питания. Должны загореться индикаторы питания и замка кюветы.
4. В графическом интерфейсе программы выставить режим RGB/Single, 25 Hz.
5. Увеличить переменное напряжение до $V = 2200$ В
6. Произвести напуск воздуха посредством однократного нажатия кнопки (7), Рисунок 2.2.
7. Произвести инъекцию микрочастиц посредством однократного нажатия кнопки (8), Рисунок 2.2.
8. Добиться множественной локализации микрочастиц – порядка от десяти и более частиц.
9. Плавно уменьшать напряжение до тех пор, пока в ловушке не останется единственная частица.
10. Плавно увеличивать напряжение до формирования расширенной орбиты (Рисунок 8.1). Записать значение напряжения V
11. Обесточить ловушку.
12. Повторять пункты 1–11 в количестве $k=10$ раз.
13. Подписать лист измерений.

Обработка результатов

Обработка результатов сводится к определению напряжения раскрытия расширенной орбиты. Определение среднего значения и погрешности осуществляется с помощью формул (3.4) – (3.5).

Содержание отчёта

1. Цель работы.
2. Пошаговый ход выполнения работы.
3. Подписанный лист измерений.
4. Расчёт среднего значения V раскрытия расширенной орбиты.
5. Анализ результатов и вывод.

Задания для самоконтроля

1. Что характеризует число Рейнольдса?
2. Как связано число Рейнольдса с формой частицы? С температурой внешней среды?
3. Оцените число Рейнольдса для частиц размером 100 нм, 1 мкм, 1 м.
4. Почему расширенные орбиты формируются при больших значениях амплитуды переменного напряжения на электродах?

ЛИТЕРАТУРА

1. Kosternoi I. A. et al. An Electrodynamic Microparticle Trap with a Rotating Toroidal Electrode //Technical Physics Letters. – 2020. – Т. 46. – №. 11. – С. 1140-1143.
2. Romanova A. V., Kosternoi I. A., Rozhdestvensky Y. V. Spatial Confinement of Microobjects in the Radiofrequency Ion Trap in a Viscous Medium //Optics and Spectroscopy. – 2020. – Т. 128. – №. 8. – С. 1292-1297.
3. Rudyi S. S. et al. Outside localization around a toroidal electrode of a Paul trap //Journal of Physics Communications. – 2020. – Т. 4. – №. 1. – С. 015022.
4. Rudyi S. S., Vovk T. A., Rozhdestvensky Y. V. Features of the effective potential formed by multipole ion trap //Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2019. – Т. 52. – №. 9. – С. 095001.
5. Rozhdestvenskii Y. V., Rudyi S. S. Nonlinear ion dynamics in a radiofrequency multipole trap //Technical Physics Letters. – 2017. – Т. 43. – №. 8. – С. 748-752.

Иванов Андрей Витальевич
Рождественский Юрий Владимирович

**Электродинамические ловушки для микрочастиц:
лабораторный практикум**

Практикум

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А