УДК 533.9.072

**Стенд для исследования эмиссии электронов с пылевых макрочастиц**

**под действием коротких лазерных импульсов**

**В.В. Сементин, А.А Сергеев, С.Э. Авферонок**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

Широкое распространение лазеров в экспериментальной физике, начиная с 1960-х годов, привело к появлению новых возможностей для решения научных и технических задач. Одна из таких задач состояла в исследовании эмиссий электронов с поверхности металла под действием коротких лазерных импульсов. Особый интерес представляет эмиссия электронов с пылевых макрочастиц. В результате эмиссий возникает пылевая плазма, которая в условиях микрогравитации и электростатического поля способна выстраиваться в определенные структуры и, будучи в агрегатном состоянии ионизированного газа, проявлять свойства твердых тел и жидкостей (эксперимент «Плазменный кристалл»). Данное обстоятельство открывает перспективы формирования наноматериалов с уникальными свойствами [1]. Схема эксперимента «Плазменный кристалл» представлена на рисунке 1.

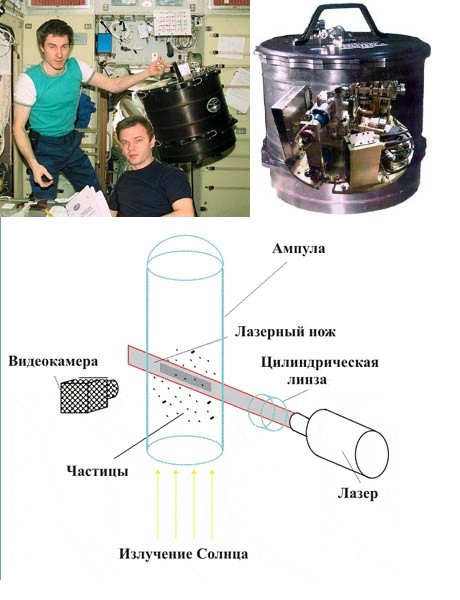


Рисунок 1 - Схема эксперимента "Плазменный кристалл"

Основной целью эксперимента является разработка экспериментального стенда для наблюдения и исследования эффектов, связанных с эмиссией электронов с пылевых макрочастиц под действием коротких лазерных импульсов.

Электронная эмиссия - явление испускания электронов в вакуум или же в какую-нибудь среду. Чтобы электрон смог покинуть вещество, нужно сообщить ему некоторую энергию, называемой работой выхода.

Установка для проведения экспериментов по исследованию эмиссии электронов с поверхности пылевых макрочастиц должна содержать в себе несколько узлов, различных по своему функциональному назначению: вакуумная камера вместе с устройствами откачки воздуха (непосредственное место возникновения эмиссии электронов), устройство для подачи пылевых частиц (контейнер, который содержит некий объем пылевых макрочастиц, щель, обеспечивающая равномерный поток частиц, механизм, открывающий крышку контейнера во время проведения эксперимента), измерительная система (электроды внутри камеры, двухканальный высокочастотный осциллограф), источник лазерного излучения (квантрон с внешним резонатором) и оптическая система (для задания хода луча и характеристик излучения). Концептуальная схема установки представлена на рисунке 2.

Работа каждого из узлов в совокупности обеспечивает работу всей экспериментальной установки в целом. Опишем подробнее каждый из узлов стенда: устройство, входные параметры, требования.

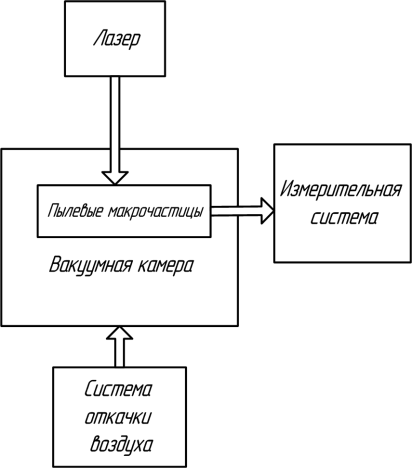


Рисунок 2 – Концептуальная схема

1. Вакуумная камера и система откачки воздуха.

Вакуумная камера, как уже говорилось выше – непосредственное место возникновения термоэлектронной и фотоэлектронной эмиссий. Для наблюдения данных процессов в камере должен обеспечиваться высокий вакуум (отношение λ/d >>1, где λ – длина свободного пробега электрона, d – диаметр вакуумной камеры). Чтобы достичь такого давления в камере, требуется на стыках соединения деталей обеспечить герметизацию, которая достигается резиновыми прокладками, но основной критерий достижения таких давлений обеспечивается за счет поддержки чистоты соприкасающихся поверхностей. Кроме того, сама вакуумная камера должна быть герметичной, а все ее швы должны быть сварены при помощи аргоновой сварки (как наиболее надежная, доступная и простая). Откачка воздуха производится поочередной работой двух насосов - форвакуумным и турбомолекулярным.

Форвакуумный насос предназначен для первичного разрежения (порядка 102 – 10-1 Па). Используется он для подготовки внутренней среды камеры для создания более разреженного вакуума. Откачка данным насосом производится до давления в 6 Па.

Турбомолекулярный насос - один из видов вакуумных насосов, служащий для создания и поддержки высокого вакуума. Способен создавать вакуум порядка 10-2 – 10-8 Па. Вращение лопастей достигает десятков тысяч оборотов в минуту.

Функциональная схема вакуумной системы приведена на рисунке 3.

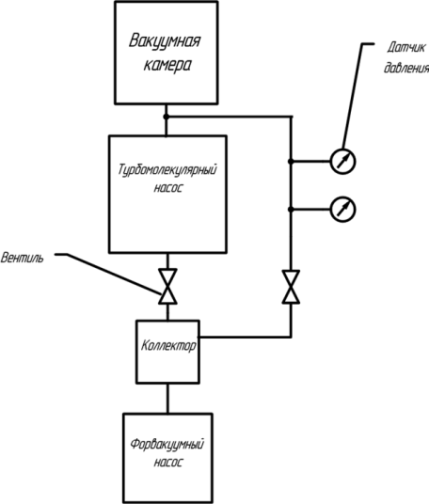


Рисунок 3 - Вакуумная система

Также был проведен расчет необходимого давления для вакуумной камеры. Необходимое нам давление в камере следует подобрать такое, чтобы значение свободного пробега молекулы λ в вакууме было такого же порядка, как и размеры камеры (примерно 10-2 – 10-1 м). При нормальных условиях (105 Па) длина свободного пробега молекулы азота (так как его концентрация в воздухе наибольшая) имеет порядок 10-8 м.

Для проведения исследований эмиссий электронов длина свободного пробега должна быть порядка размеров камеры (10-2 – 10-1 м). Таким образом определяется требуемое давление в камере, для достижения необходимой длины свободного пробега молекулы азота, которое составляет 0,044 Па, что как раз достигается посредством имеющегося оборудования.

1. Система выброса пылевых макрочастиц

Система выброса пылевых макрочастиц соединена непосредственно с вакуумной камерой – прикреплена к ее крышке. В самой крышке имеется отверстие для заполнения контейнера пылевыми частицами (во время откачки воздуха отверстие закупоривается еще одной крышкой).

В общих чертах, система выброса пылевых макрочастиц состоит из контейнера; крышки вакуумной камеры, к которой крепится контейнер; системы открытия крышки контейнера, система подачи пылевых макрочастиц. В качестве пылевых макрочастиц в данный момент времени используется титановый порошок.

Необходимо обеспечить такой поток пылевых макрочастиц, чтобы осциллограф мог зарегистрировать результирующий эмиссионный ток. Минимально возможное усиление на осциллографе составляет 1 мВ, следовательно, сигналы с меньшей амплитудой не будут различимы. Кроме того, сторонние шумы также будут вносить искажения, а следовательно, минимально возможный различимый сигнал должен быть еще на порядок больше. Так как на входе осциллографа стоит сопротивление 50 Ом, получаем, что минимальный ток, необходимый для регистрации и анализа эмиссии электронов, составит 200 мкА.

Минимальный ток необходим для установления параметров пылевого потока. Согласно трудам и оценкам В.Е. Фортова и Морфилла Г.Е. [2], с пылевой макрочастицы титана диаметром порядка 50 мкм под действием лазерного излучения (длительность импульса – 10 нс) вылетает порядка 103 - 105 электронов. Таким образом, ток с одной пылевой частицы лежит в диапазоне от 0,016 мкА до 1,6 мкА. В итоге, минимально допустимый диапазон пылевых частиц, на которые попадает излучение лазера за один импульс, для регистрации и обработки явления эмиссии электронов составит от 125 до 12500 частиц.

Пылевые частицы содержатся в конусообразном контейнере, который снабжен электромотором с эксцентриком для обеспечения вибрации, которая требуется для более равномерного расхода пылевых частиц. Частицы высыпаются через щель на дне контейнера. Варьируя размеры щели при неизменных габаритах контейнера (размеры контейнера ограничены размерами вакуумной камеры; в контейнер помещается примерно 200 грамм титановой пыли), есть возможность контролировать расход частиц и плотность потока частиц.

Была проведена оценка порядка числа частиц, оказывающихся под действием лазерного излучения, основанная на расходе. Согласно ней, достаточный порядок числа частиц, требуемый для анализа явления эмиссии электронов, достигается при размере щели 20x1 мм.

1. Оптическая система формирования лазерного излучения

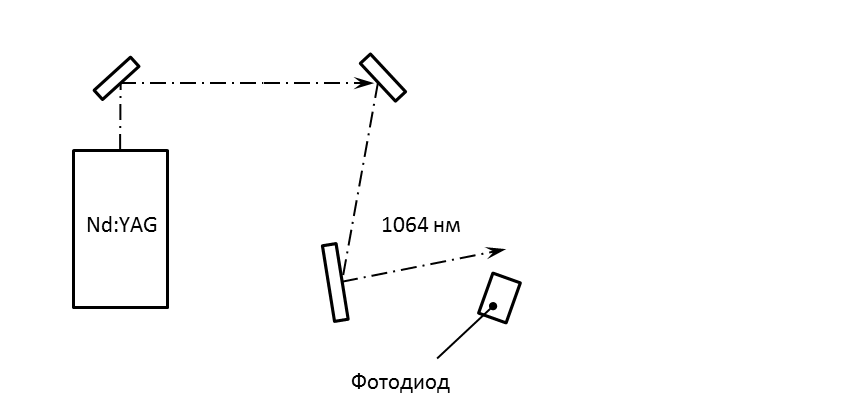
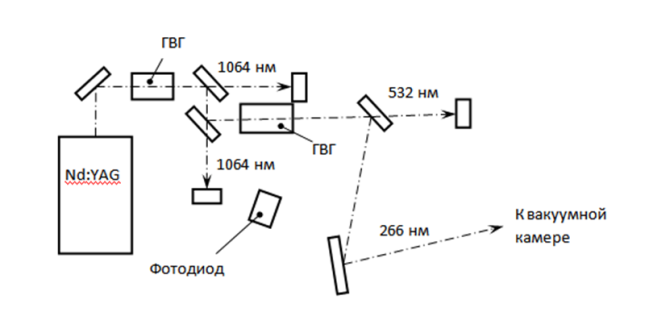
Лазер, используемый в лабораторной установке представляет собой квантрон Nd:YAG с внешним резонатором. Оптическая схема формирует направление излучения и некоторые его характеристики (например, длину волны излучения посредством использования нелинейных кристаллов для генерации гармоник). Есть возможность дополнять оптическую схему нелинейными кристаллами, в результате чего можно изменять длину волны светового пучка в зависимости от интересующих нас целей. Исходный диаметр пучка равен активной среде квантрона, а именно 8 мм. Имеется возможность изменять диаметр пучка посредством использования в оптической системе линз. Аналогично есть возможность изменять энергию импульса (стандартная энергия импульса – 50 мДж для основной гармоники), длительность импульса (минимальная длительность ограничена полосой пропускания осциллографа – 2 нс, но на практике используется длительность импульса порядка 10 нс), а следовательно, и пиковую мощность.

Основная излучаемая длина волны Nd:YAG лазера – 1064 нм. В этом случае в оптической схеме нет нелинейных кристаллов. Данная конфигурация используется для исследования процессов термоэлектронной эмиссии – выбивании электронов с поверхности металла под действием нагрева. Кроме того, данная конфигурация позволяет наблюдать и многофотонные процессы.

Для наблюдения фотоэлектронной эмиссии необходимо получение четвертой гармоники, так как энергии фотонов при длине волны 266 нм достаточно для фотоинозации титана (работа выхода титана – 4,33 эВ). Четвертую гармонику получаем, используя в оптической системе два нелинейных кристалла титанил-фосфата калия (KTP).

Кроме того, экспериментальная установка позволяет исследовать процесс абляции. Для исследования абляции используется линза с фокусным расстоянием 200 мм, дающая в фокусе диаметр перетяжки, равный 500 мкм.

Оптическая функциональная схема приведена на рисунке 4. Слева – конфигурация на длине волны 266 нм, справа – конфигурация на основной гармонике (1064 нм).

****

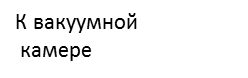


Рисунок 4 - Оптическая схема

1. Измерительная система

Использование в экспериментальной установке электрической цепи позволяет управлять электронными устройствами внутри вакуумной камеры в закрытом состоянии. Кроме того, с использованием электрической цепи и источника высокого напряжения задается напряжение между электродами в вакуумной камере. Связь электроники внутри и снаружи камеры обеспечивается посредством герморазъема.

Регистрация малых токов в результате эмиссии – одна из основных задач данной работы. Ранее была проведена оценка минимального тока, который составил 200 мкА.

Между электродами внутри камеры создается электрическое поле, значения которого варьируются в пределах от 0 до 30000 В/м, посредством высоковольтного источника питания. Эмитированные с пылевых частиц электроны достигают анода.

При регистрации столь малых сигналов шумы вносят практически все элементы электрической цепи, включая даже индуктивность проводов. Таким образом, одна из задач разработки измерительной системы – минимизировать шумы, вносимые самой измерительной системой. Уменьшение посторонних шумов достигается уменьшением длины проводников, изоляцией установки от внешнего электромагнитного излучения, заземлением аппаратуры.

Так как полоса пропускания осциллографа составляет 500 МГц, то постоянная времени составит 2 нс, отсюда получаем минимально требуемую емкость конденсатора – 40 пФ (сопротивление на входе осциллографа – 50 Ом). На практике постоянная времени соизмерима с длительностью лазерного импульса, т.е. 10 нс. Таким образом, рекомендуемая емкость конденсатора составит 200 пФ. Данная RC-цепочка работает как фильтр верхних частот для пропускания коротких импульсов сигнала (не длиннее постоянной времени). Во избежание воздействия на осциллограф негативного влияния высоких значений токов в измерительной системе используется сопротивление нагрузки в 1 МОм.

Электрическая схема представлена на рисунке 5.

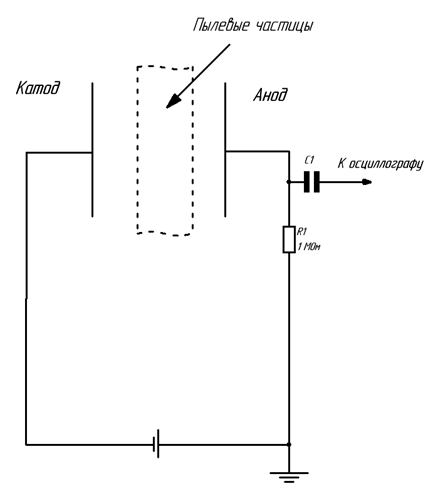


Рисунок 5 - Электрическая схема

Полученные результаты экспериментов представлены на рисунке 6.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Рисунок 6

Слева - термоэлектронная эмиссия, справа – фотоэлектронная.

(синий график – сигнал от лазера, красный – сигнал с электродов)

**Библиографический список:**

1. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. Пылевая плазма. М.: Объединенный институт высоких температур РАН, 2004.
2. Морфилл Г.Е. Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос. / под ред. Фортова В.Е. М.,2013. 444 с.
3. Анисимов С.И., Бендерский В.А., Фаркаш Д. Нелинейный фотоэлектрический эффект в металлах под действием лазерного излучения. М.: Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, 1977. 38с.