УДК 533.9.072

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

**ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЫЛЕВЫХ МАКРОЧАСТИЦ**

**ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

**В.В. Сементин, А.А Сергеев**

*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. Схема эксперимента «Плазменный кристалл» представлена на рисунке 1.

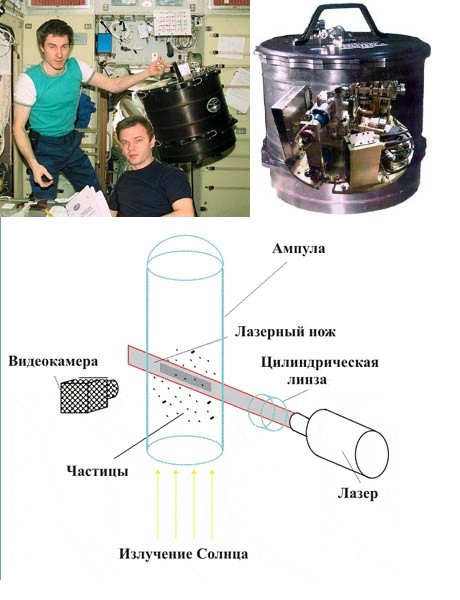


Рисунок 1 - Схема эксперимента "Плазменный кристалл"

Основной целью эксперимента является экспериментальное подтверждение, наблюдение и анализ эффектов, связанных с эмиссией электронов с пылевых макрочастиц под действием коротких лазерных импульсов. Наиболее вероятно наблюдение и анализ эмиссий электронов двух видов: термоэмиссии и фотоэмиссии. Также возможно появления и многофотонной эмиссии, но вероятность ее появления небольшая, ведь для наблюдения данного эффекта требуются высокие интенсивности света.

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

Итак, мы исследуем два наиболее вероятных случая: термоэмиссию и фотоэмиссию. Термоэлектронная эмиссия – процесс испускания электронов с металла вследствие его нагрева. Так как концентрация свободных электронов в металле довольно большая,  то даже при средних температурах вследствие распределения электронов по скоростям (по энергии) некоторые электроны обладают достаточной энергией для преодоления [потенциального барьера](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B1%D0%B0%D1%80%D1%8C%D0%B5%D1%80). К тому же, с повышением температуры число электронов, [кинетическая энергия](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F) теплового движения которых больше [работы выхода](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0_%D0%B2%D1%8B%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0), растёт, и явление термоэлектронной эмиссии становится более заметным.

Зависимость термоэлектронного тока от анодного напряжения носит нелинейный характер, описывается законом трех вторых (в случае невысоких и положительных напряжений):

(1)

где B – коэффициент, зависящий от формы, размеров электродов и их взаимного расположения.

При увеличении анодного напряжения термоэлектронный ток достигает некого предельного значения, называющийся током насыщения. Обусловлен он тем, что при данном напряжении все электроны, вылетающие с катода, достигают анода, а следовательно, дальнейшее увеличение напряжения не приведет к увеличению эмиссионного тока. Таким образом, плотность тока насыщения характеризует способность к эмиссии катода.

Фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект) – процесс испускания металлом электронов под действием электромагнитного излучения. При этом во внешнем электрическом поле образуется упорядоченное движение электронов, называемое фототоком. Фотоэлектронная эмиссия подчиняется трем законам внешнего фотоэффекта (законы Столетова):

1. Первый закон фотоэффекта – сила фототока насыщения прямо пропорциональна интенсивности излучения, падающего на фотокатод;
2. Второй закон фотоэффекта – максимальная кинетическая энергия электронов, вылетевших с катода, прямо пропорциональна частоте излучения, но не зависит от  его интенсивности.
3. Третий закон фотоэффекта – для каждого материала при определенных параметрах его поверхности существует нижний предел частоты излучения, и при освещении излучением с частотой ниже предельной фотоэффект не наблюдается. Такая частота называется красной границей фотоэффекта.

Природа фотоэффекта была объяснена в 1905 году Альбертом Эйнштейном на основе гипотез Макса Планка о квантовой природе света. Исходя из закона сохранения энергии Эйнштейном была выведена формула:

(2)

где ν - частота падающего фотона, Aв – работа выхода, - максимальная кинетическая энергия вылетевшего электрона, h – постоянная Планка.

Кроме того, было установлено, что фотоэффект происходит безынерционно, то есть, процесс вылета электронов начинался сразу же с момента начала воздействия излучения. Благодаря этой характерной черте имеется возможность выделять фотоэлектронную эмиссию на фоне сторонних процессов (как правило, термоэлектронной эмиссии).

Также, основные физические процессы в металле при фотоэлектронной эмиссии объясняются теорией Фаулера, которая утверждает, что после того, как фотон попадет на металл, его энергия переходит в энергию электронов проводимости, и таким образом электронный газ в металле состоит из частиц с нормальным распределением Ферми - Дирака и частиц, возбужденных под действием кванта света.

Для исследования эмиссии электронов с поверхности пылевых макрочастиц был разработан стенд со всеми необходимыми условиями, которые требуются для появления процессов эмиссии. Кроме того, пылевые частицы имеют сферическую форму (со средним диаметром в 50 мкм, титановая пыль), а следовательно, можно экспериментально определить, какой заряд может приобрести одна пылевая макрочастица.

Макетный стенд разделяется на четыре подсистемы, в совокупности обеспечивающие работу стенда. Это система подачи (выброса) пыли, измерительная система, вакуумная система и оптическая система для формирования лазерного излучения.

Для исследования эмиссии электронов требуется вакуум. Все процессы проходят в вакуумной камере, в которой требуется обеспечение высокого вакуума (отношение >> 1, где λ – длина свободного пробега электрона, d – диаметр вакуумной камеры). Откачка воздуха производится поочередной работой двух насосов - форвакуумным и турбомолекулярным.

Контроль давления производится при помощи ионизационных датчиков давления.

Система выброса пыли обеспечивает равномерный поток падающих пылевых макрочастиц, также есть возможность изменять интенсивность потока пылевых макрочастиц.

Лазер в оптической системе 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). Длительность импульса составляет порядка 10 нс за счет модуляции добротности, энергия в импульсе основной гармоники составляет 150 мДж.

Для исследования процессов термоэлектронной эмиссии используется основная гармоника Nd:YAG-лазера. Для фотоэлектронной эмиссии данная конфигурация не годится, так как энергии фотона с длиной волны 1064 нм недостаточно, чтобы выбить электрон с поверхности титана (работа выхода титана 4,33 эВ).

Для наблюдения фотоэлектронной эмиссии необходимо получение четвертой гармоники, так как энергии фотонов при длине волны 266 нм достаточно для фотоинозации титана. Четвертую гармонику получаем, предварительно получив вторую гармонику (532 нм). Для ее получения по ходу луча требуется поставить нелинейный кристалл титанил-фосфата калия (KTP); при этом луч, прошедший через него, содержит в себе и основную гармонику (1064 нм), и вторую (532 нм). Чтобы убрать ненужную основную гармонику, по ходу луча вместо одного из зеркал ставится дихроическое зеркало. Для получения четвертой гармоники (266 нм) требуется дополнить предыдущую конфигурацию. По ходу луча второй гармоники следует установить еще один нелинейный кристалл, затем по ходу луча поставить еще одно дихроическое зеркало, чтобы отсеять вторую гармонику. Конфигурация с использованием четвертой гармоники дает возможность наблюдать за явлением фотоэлектронной эмиссии с поверхности пылевых макрочастиц титана, так как в этом случае энергия фотона больше работы выхода электронов с титана (4,33 эВ). Энергия в импульсе четвертой гармоники составляет 1 мДж.

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. Высокое напряжение задается для того, чтобы переориентировать и направить все электроны, эмиттирующие с пылевых макрочастиц, в сторону анода. Измерительная система состоит из плоскопараллельных катода и анода, к аноду подключен осциллограф, между осциллографом и источником питания – сопротивление нагрузки и конденсатор (нагрузка нужна для защиты цепи питания, а конденсатор – для пропускания импульсного тока). Связь электроники внутри и снаружи камеры обеспечивается посредством герморазъема. Данная система может регистрировать электроны, вылетевшие с одной пылевой макрочастицы.

Полученные результаты представлены на рисунке 2. Экспериментально подтверждается инерционность термоэлектронной эмиссии и практически безынерционность процесса фотоэлектронной эмиссии.

|  |  |
| --- | --- |
| nport4 | nport1 |

Рисунок 2

Слева - термоэлектронная эмиссия, справа – фотоэлектронная.

(желтый график – сигнал от лазера, розовый – сигнал с электродов)

**Библиографический список:**

1. 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.

2. Морфилла Г.Е. Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос. / под ред. Фортова В.Е. М.,2013. 444 с.

3. Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. / Перевод с англ. А. Л. Мусатова. М., 1973.