# Влияние параметров лазерного излучения на процессы генерации плазменно-пылевых образований

А.С. Борейшо1, С.В. Ивакин1, А.В. Савин1, В.В. Сементин1, П.Ю. Сердобинцев2, А.А. Сергеев3

*1 БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия*

*2 СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия*

*3 Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия*

sergeev.a.san@yandex.ru

# Influence of laser radiation parameters on the generation processes of plasma-dust formations

A.S. Boreysho1, S.V. Ivakin1, A.V. Savin1, V.V. Sementin1, P.U. Serdobintsev2, A.A. Sergeev3

1 BSTU «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russia  
2 St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

3 Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St. Petersburg, Russia

*Abstract ‑*The article presents experimental results on charging of free falling titanium dust particles with feature size of about 40 micrometers by femtosecond laser pulses. The results include the ratio of the achieved dust particle charge under different conditions: the beam size, energy and duration of laser pulses. Multi-photon ionization issues, the degree of a nonlinear process and quantum efficiency of the femtosecond charging are discussed.

*Keywords ‑* Plasma-dust formations, multi-photon ionization, quantum efficiency, nonlinear processes.

1. Введение

Фотоионизационная пылевая плазма широко распространена в космическом пространстве. Она обнаружена в верхних слоях атмосфер планет, вблизи поверхностей безатмосферных небесных тел естественного и искусственного происхождения, в хвостах комет и др. Индуцируемые солнечным излучением и потоками заряженных частиц плазменно-пылевые образования (ППО) исследуются в ходе наземных и космических экспериментов [1].

В качестве инструмента для лабораторных исследований процессов фотоионизационной зарядки пылевых частиц целесообразно использовать лазеры. С помощью лазера можно облучать пылевые частицы потоками монохроматического излучения в различных диапазонах длин волн и интенсивностей как в непрерывном, так и в импульсном режимах, реализуя фотоэмиссионные, многофотонные, термоэмиссионные механизмы зарядки ППО [2].

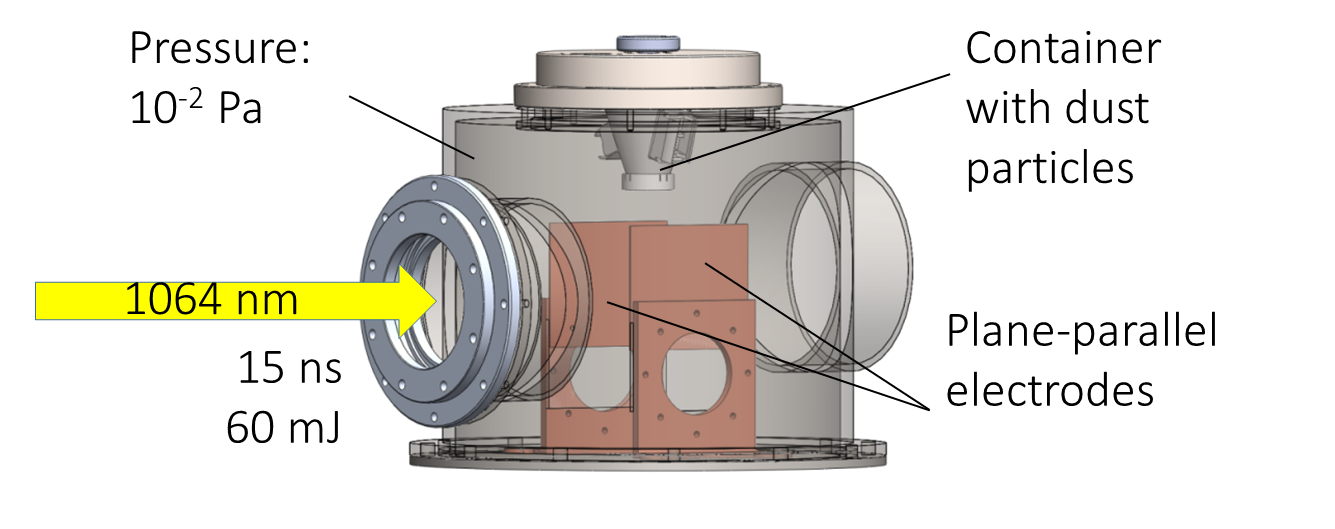
В настоящей статье рассматриваются вопросы фотоионизационной зарядки пылевых частиц титана диаметром ~40 мкм под воздействием фемтосекундных (50 фс) лазерных импульсов различной интенсивности.

1. Описание экспериментальной установки

Для экспериментов по зарядке пылевых частиц необходимо обеспечить необходимый вакуум для беспрепятственного распространения заряженных частиц от мишени до электродов. Для этого было рассчитано необходимое давление, при условии, что длина свободного пробега молекул азота должна быть не меньше характерных размеров вакуумной камеры. В данном случае, за характерный размер камеры был взят ее диаметр 150 мм (форма камеры цилиндрическая, а ее высота меньше диаметра, см. рис. 1). В этом случае необходимое давление составляет около 10-2 Па.

Инжектор частиц

Вакуумная камера



Электроды

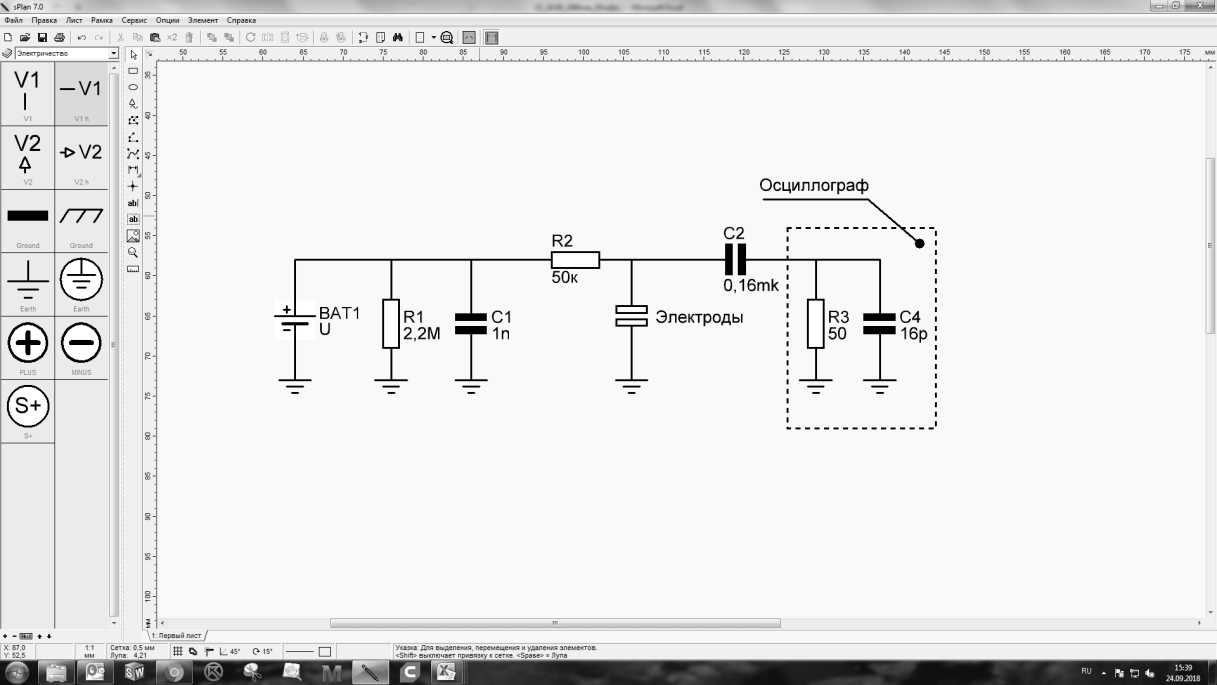
Рис. 1 Модель вакуумной камеры

Обеспечение необходимого давления было реализовано с помощью двухэтапной откачки воздуха из объема камеры: для достижения форвакуума использовался насос VRD-4, далее откачка производилась с помощью турбомолекулярного насоса НВТ-100 ФГ. Контроль давления в камере осуществлялся с помощью термопарной и ионизационной ламп ПМТ-2 и ПМИ-2 соответственно.

Регистрация заряженных частиц производилась с помощью установленных друг напротив друга на расстоянии 35 мм плоскопараллельных медных пластин. Обе пластины были установлены на кронштейны из диэлектрического материала.

С помощью стабилизированного источника высокого напряжения HT–4000P между пластинами создавалось электростатическое ускоряющее поле, необходимое для увлечения всех выбитых заряженных частиц в направлении электродов. Напряженность электростатического поля между пластинами варьировалось в диапазоне от 0 до 650 В/см.

Электрическая схема цепей регистрации сигнала и обеспечения необходимого потенциала между электродами представлена на рис. 2. Сигнал выводился на осциллограф Teledyne LeCroy WaveSurfer 454.



1М

Рис. 2 Схема электрическая принципиальная

Для инжекции частиц титана в область между электродами использовался конусообразный контейнер с соплом в виде щели с размерами 16×1 мм. Равномерность потока по времени достигалась с помощью установленного на контейнер электромотора с эксцентриком на валу.

На рис. 3 представлена временная зависимость сигнала, регистрируемого на осциллографе. Следует отметить, что среднее значение сигнала в диапазоне от 0 с до 60 с изменялось незначительно, а спад сигнала на промежутке от 60 с до 68 с вызван опустошением контейнера. Так же заметим, что относительное отклонение сигнала не превосходит 22 %. Эти значения важны для оценки заряда одной частицы, т. к. количество засвеченных частиц определяется расчетным методом, исходя из геометрических характеристик и массового расхода свободно падающего потока пылевых частиц с учётом диаметра подсвечиваемой области.

Рис. 3 Стабильность сигнала

Зарядка пылевых частиц титана производилась импульсами основной гармоники фемтосекундного Ti:Sapphir-лазера с длинной волны 790 нм и шириной полосы генерации 20 нм. Исходный диаметр пятна составлял 6 мм, длительность импульса – 50 фс, частота следования импульсов ‑ 10 Гц.

На рис. 4 представлена типичная диаграмма стабильности энергии лазера от времени. В ходе экспериментов, перед каждым экспериментом снималась подобная диаграмма. Отметим, что при энергии импульса 3.3 мДж её относительное отклонение не превосходило 4 %.

Рис. 4 Диаграмма стабильности энергии лазера

Для определения положения сигнала (импульса фототока) на временной координате осуществлялась синхронизация осциллографа по импульсу лазерного излучения, который регистрировался с помощью фотодиодного датчика Ophire FPS-1.

Для обеспечения чистоты эксперимента за падающим потоком пылевых частиц был под углом Брюстера к оптической оси установлен нейтральный фильтр, который поглощал остаточное лазерное излучение.

1. Результаты экспериментов

Эксперимент проводился следующим образом. Сначала измерялась вольт-амперная характеристика для определения диапазона значений, где функция слабо зависит от аргумента, иначе говоря где напряженности поля достаточно, для того чтобы все выбитые с мишени электроны были зарегистрированы.

Далее выбиралось определенное значение напряженности поля, в дальнейшем постоянное, и проводились серии измерений зависимости фототока от плотности энергии и длительности лазерного импульса. Плотность энергии варьировалась двумя способами: изменением диаметра пятна при постоянной энергии в импульсе и изменением энергии в импульсе при постоянном диаметре пятна.

В ходе эксперимента измерялось напряжение на конденсаторе С4, емкость которого составляла примерно 200 пФ. Пересчет регистрируемого напряжения в заряд одной частицы осуществлялся через соотношение:

*n* = *U*∙*C* / (*e*∙*N*)

где *U* – измеренное напряжение, *С* – емкость конденсатора, *e* – элементарный электрически заряд, *N* – число засвеченных пылевых частиц.

На рис. 5 представлена зависимость достигаемого заряда одной пылевой частицы от напряжённости электростатического поля, соответствующая вольт-амперной характеристике системы. На графике видно, что в диапазоне напряженности поля от 400 до 575 В/см заряд частицы не зависит от напряженности. Все последующие эксперименты проводились при напряженности поля 575 В/см.

Рис. 5 Вольт-амперная характеристика системы

Ниже представлены зависимости заряда частицы от плотности потока фотонов. На рис. 6 и рис. 7 показано, что полученные экспериментально зависимости хорошо аппроксимируются степенной функцией с показателем степени 3, который говорит о степени нелинейности процесса [2]. На рис. 8 представлена зависимость достигаемого заряда пылевой частицы от плотности потока фотонов, варьируемой изменением длительности импульсов лазерного излучения.

Рис. 6 Зависимость заряда частицы от плотности потока фотонов (плотность потока фотонов варьировалась изменением диаметра пятна излучения)

Рис. 7 Зависимость заряда частицы от плотности потока фотонов (плотность потока фотонов варьировалась изменением энергии лазерного импульса; среднее значение относительного отклонения составило 11.5%.)

Рис. 8 Зависимость заряда частицы от плотности потока фотонов (плотность потока фотонов варьировалась изменением длительности лазерного импульса)

1. Заключение

Таким образом, были проведены эксперименты по зарядке пылевых титановых частиц при воздействии на них фемтосекундными лазерными импульсами различной интенсивности.

Показано, что заряд пылевой частицы в большей степени зависит от плотности энергии чем от плотности мощности падающего на неё фемтосекундного излучения с длиной волны 790 нм. Зарегистрированные зависимости заряда пылевой частицы свидетельствуют о протекании процессов многофотонной ионизации третьей степени нелинейности, что соответствует теоретической оценке. Квантовая эффективность процесса зарядки пылевых частиц фемтосекундными импульсами (отношение количества выбитых с одной частицы электронов к количеству фотонов, падающих на частицу) составила ~10-8, что на два порядка превышает полученное [2] для наносекундных импульсов значение ~10-10.

Благодарности

В экспериментах использовалось оборудование Ресурсного центра «Физические методы исследования поверхности» Санкт-Петербургского государственного университета.

Литература

1. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174, № 5. С. 495–544.
2. A.Boreysho, O.Petrov, A.Savin, A.Sergeev, A.Kolychev. Interaction of high power laser pulses with ensemble of solid particles // Proc. SPIE 11042, XXII International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, 110420U (3 January 2019)

Настоящим подтверждаю правильность перевода данного документа с русского языка на английский язык. Сведений, содержащих научно-техническую информацию, подлежащую экспортному контролю нет.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 2019 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Подпись \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ подтверждаю

Начальник СЭК Е.Н. Чернышков