

Температура и концентрация электронов лазерно-эмиссионной плазмы Al при ее формировании парными импульсами

И. А. Анушкевич

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;

e-mail: anushkevich.1997@mail.ru

Представлены результаты определения температуры и концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме при ее формировании парными импульсами YAG:Nd³⁺-лазера (1,06 мкм) на поверхности алюминия. Приведены экспериментально полученные интенсивности спектральных линий алюминия $\lambda_1 = 308,2$ нм и $\lambda_2 = 309,28$ нм в зависимости от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Показано, что интенсивность спектральных линий, температура и концентрация электронов принимают максимальные значения при задержках второго лазерного импульса относительно первого находящихся в диапазоне 1–10 мкс. Показано, что температура лазерно-эмиссионной плазмы достигает порядка 22000 К, а концентрация электронов в ней – $9 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Ключевые слова: лазерно-эмиссионная плазма, электронная температура плазмы, концентрация электронов, межимпульсный интервал, эрозионный факел.

Введение

Изучение спектров лазерно-эмиссионной плазмы, измерение интенсивностей ее эмиссионных линий позволяют проводить идентификацию элементов и измерять их концентрацию [1, 2]. Определение элементного состава вещества является важной составляющей современных производств. Достоинствами лазерно-эмиссионного анализа являются экспрессность, низкие пределы обнаружения, возможность определения ряда элементов в одной пробе [3, 4]. В начале развития лазерно-эмиссионного спектрального анализа испарение вещества осуществлялось одиночными лазерными импульсами. Однако стабильность спектра лазерной плазмы была низкой.

Возможности лазерно-эмиссионного спектрального анализа, а также технологий обработки деталей и изделий, существенно расширились с использованием двухимпульсного формирования плазмы, при котором наблюдается резкое увеличение выноса материала из эрозионного кратера и рост интенсивности спектральных линий химических элементов эрозионного факела [2, 5, 6]. В работах [7, 8] показано, что уменьшение межимпульсного интервала до единиц микросекунд приводит к росту эффективности абляции парными наносекундными лазерными импульсами алюминиевой и медной пластинок в 5–6 раз, по сравнению с одноимпульсной абляцией.

В работах [9, 10] была показана определяющая роль температуры эрозионного кратера и повторного испарения наноразмерного вещества плазменного факела, образованного первым в паре лазерным импульсом, на значительный рост абляции материала и интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании парными импульсами. Также уменьшение величины задержки второго лазерного импульса относительно первого приводило к росту абляции вещества.

Для ряда практических применений необходимо знать свойства излучающей плазмы. Их знание позволяет сформулировать требования к ее наиболее оптимальному формированию. Определение параметров плазмы на основе изучения ее спектров обеспечивает бесконтактность и экспрессность. В связи с этим, развитие методов спектральной диагностики лазерной плазмы является актуальной задачей, как для понимания физики происходящих процессов, так и для практического применения.

Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проводились на модернизированной установке, представленной на рис. 1 и описанной в [6]. Излучение YAG:Nd³⁺-лазера (1,06 мкм) на поверхности алюминиевой мишени формировало лазерно-эмиссионную

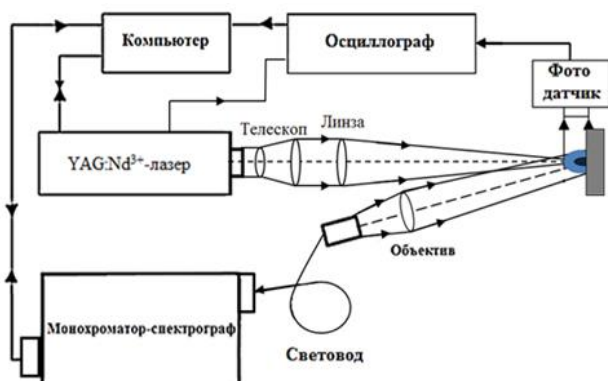


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки.

плазму, излучение которой с помощью объектива вводилось в световод и направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i. Регистрация спектра на выходе MS 2004i осуществлялась регистратором излучения UC-16H10420-1106 на базе ПЗС-линеек с размером светочувствительной зоны $28,672 \times 0,896$ мм² и количеством активных пикселей 2048×64 . Задержка второго лазерного импульса относительно первого могла изменяться в диапазоне 0–300 мкс.

Полученные результаты

На рис. 2 приведены фотографии свечения лазерно-эмиссионных плазменных факелов сформированных на поверхности алюминия при воздействии на него парными лазерными импульсами при временных задержках между ними 1 мкс (1), 5 мкс (2),

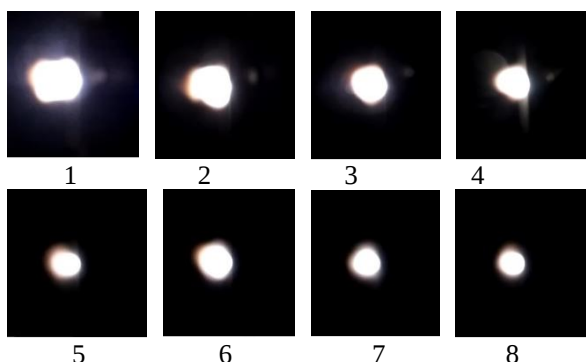


Рис. 2. – Фотографии лазерно-эмиссионных плазменных факелов при различных задержках между лазерными импульсами.

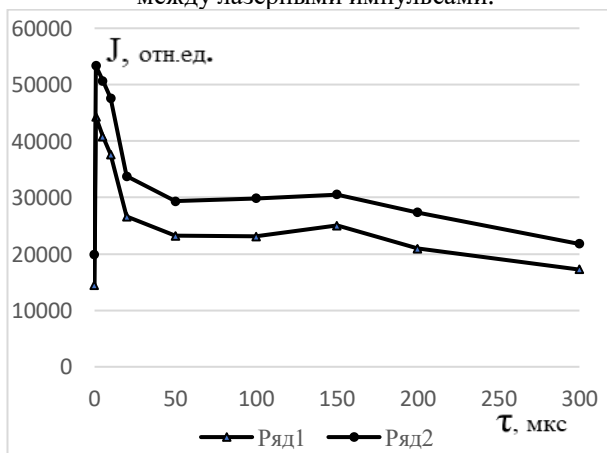


Рис. 3. – Зависимости интенсивности линий алюминия от задержки второго лазерного импульса относительно первого.

10 мкс (3), 20 мкс (4), 50 мкс (5), 100 мкс (6), 150 мкс (7) и 200 мкс (8). Суммарная энергия лазерных импульсов составляла 43 мДж (23 мДж + 20 мДж). Видно, что форма и размер плазменных факелов в зависимости от задержки второго лазерного импульса относительно первого сильно различаются. Высота плазменного факела при задержке 1 мкс составляла порядка 7–8 мм, а его ширина примерно 5–6 мм. При задержках между импульсами 20 мкс его размеры уменьшались примерно в 1,5 раза.

На рис. 3 приведены зависимости интенсивности спектральных линий Al I 308,2 нм (ряд 1) и Al I 309,28 нм (ряд 2) лазерно-эмиссионной плазмы алюминия от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Энергия лазерных импульсов составляла 43 мДж (23 мДж + 20 мДж). Видно, что для обеих спектральных линий максимальная их интенсивность наблюдалась при задержках 1–10 мкс. При задержках больших 20 мкс интенсивности этих линий уменьшаются практически в 2 раза.

Взятые из рис. 3 значения интенсивностей спектральных линий подставлялись в соответствующие формулы для расчета электронной температуры плазмы [11, 12]. Были рассчитаны температуры лазерно-эмиссионной плазмы в зависимости от задержки второго лазерного импульса относительно первого в диапазоне 0–300 мкс. Вероятности спонтанных переходов и статистические веса возбужденного и основного состояния брались из [13]. На рис. 4 представлена зависимость температуры лазерно-эмиссионной плазмы от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Из рис. 4 видно, что температура лазерно-эмиссионной плазмы сильно зависит от задержки второго лазерного импульса относительно первого в течение первых 10 мкс. В диапазоне задержек 20 – 300 мкс температура плазмы практически не изменялась.

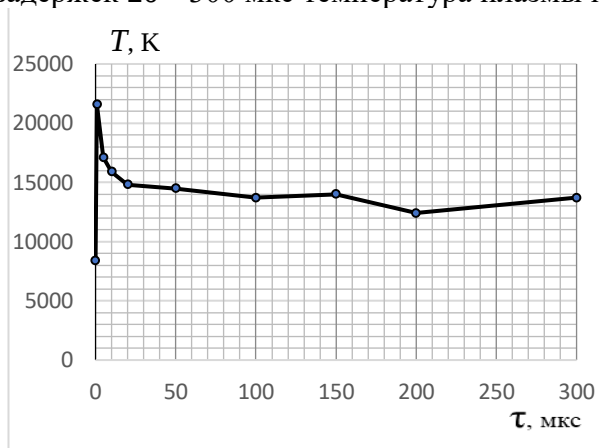


Рис. 4. – Зависимость температуры лазерно-эмиссионной плазмы алюминия от задержки второго лазерного импульса относительно первого.

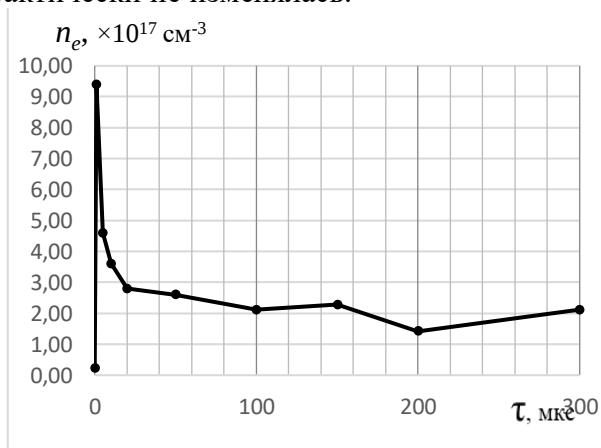


Рис. 5. – Зависимость концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме от задержки второго лазерного импульса относительно первого.

Взятые из рис. 4 значения температур подставлялись в уравнения Саха-Людгмера и вычислялись концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме в зависимости от задержки второго лазерного импульса относительно первого. На рис. 5 представлена зависимость концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Видно, что концентрация электронов сильно зависит от задержки второго лазерного импульса относительно первого в течение первых 10 мкс. В диапазоне задержек 20 – 300 мкс она почти не изменялась. Такое поведение интенсивностей спектральных линий алюминия, электронной температуры лазерно-эмиссионной плазмы и концентрации электронов в ней обусловлено тем, при малых задержках второго лазерного импульса относительно первого происходит взаимодействие плазменных факелов, образованных последовательно идущими лазерными импульсами. Плазменный факел, сформированный первым лазерным импульсом, дополнительно разогревается как вторым лазерным импульсом, так и вторым плазменным факелом изнутри. При больших межимпульсных интервалах мы регистрируем свечение двух практически независимых плазменных факелов следующих один за другим.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, ее температура и концентрация электронов в ней принимают максимальные значения при задержках второго лазерного импульса относительно первого находящихся в диапазоне 1-10 мкс, электронная температура достигает $\sim 22000 \text{ K}$, а концентрация электронов $\sim 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Литература

1. Скворцов Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел. М., 2015.
2. Креммерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. М., 2009.

3. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И., Зноско К.Ф. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавленного корунда. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 2. С. 83–94.
4. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И., Зноско К.Ф., Бельков М.М. Исследование химического состава глазурей керамических плиток. Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
5. Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф. Зависимость интенсивности спектральных линий углерода от структуры железных сплавов при двухимпульсной лазерной абляции. Вестник БГУ. 2011. № 2. С. 10–13.
6. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.М. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины. Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, № 2. С. 285–292.
7. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. 2020. Т. 10, № 3. С. 100–113.
8. Зноско К. Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. 2021. Т. 11, № 1. С. 45–58.
9. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. 2020. Т. 10, № 2. С. 103–115.
10. Зноско К.Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. 2021. Т. 11, № 1. С. 94–106.
11. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.
12. Зноско К. Ф. Температура и концентрация электронов лазерно-эмиссионной плазмы металлов и сплавов при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. 2021. Т. 11, № 2. С. 107–120.
13. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомных ионов: Справочник. М., 1986.

The temperature and electron concentration of the laser-emission plasma Al during its formation by paired pulses

I. A. Anushkevich

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus;
e-mail: anushkevich.1997@mail.ru*

The results of determining the temperature and concentration of electrons in a laser-emission plasma during its formation by paired pulses of a YAG: Nd³⁺ laser (1.06 μm) on the aluminum surface are presented. The experimentally obtained intensities of the spectral lines of aluminum $\lambda_1 = 308.2$ nm and $\lambda_2 = 309.28$ nm are given, depending on the delay of the second laser pulse relative to the first. It is shown that the intensity of the spectral lines, the temperature and the concentration of electrons take on maximum values at delays of the second laser pulse relative to the first being in the range of 1–10 μs. It is shown that the temperature of the laser-emission plasma reaches about 22000 K, and the electron concentration is $9 \cdot 10^{17}$ cm⁻³.

Keywords: laser-emission plasma, electron plasma temperature, electron concentration, inter-pulse interval, erosion torch.