

Характер движения плазмы за светодетонационным комплексом при лазерной обработке металлического образца, находящегося во внешнем электрическом поле

И. О. Бодак, С. В. Васильев, И. К. Губаревич, А. Ю. Иванов, А. Л. Ситкевич

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,
e-mail: ion_ne@mail.ru*

На основании анализа временного изменения вида интерферограмм, рассчитаны зависимости скорости перемещения фронта плазменного факела от времени при различном направлении вектора напряженности внешнего электрического поля. Интерферограммы также показывают, что электрический пробой, происходящий при достижении плазменного облака электрода второго электрода, приводит к взрывному росту плотности электронов в плазменном образовании. В отверстии второго электрода образуется плазменный сгусток, в пределах которого плотность электронов превышает 10^{20} см^{-3} , что означает полную ионизацию продуктов эрозии в плазменном образовании. Это приводит к эффективному поглощению лазерного излучения плазменным факелом и, как следствие, к экранировке мишени от воздействующего излучения

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение; внешнее электрическое поле; лазерная плазма; электрический пробой; светодетонационный комплекс; экранировка.

Characteristics of plasma motion after light-detonation complex generation during laser treating of metal sample in the external electric field

I. O. Bodak, S. V. Vasiliev, I. K. Gubarevich, A. Yu. Ivanov, A. L. Sitkevich

Grodno State University named after Yanka Kupala, Grodno, Belarus, e-mail: ion_ne@mail.ru

On the basis of the analysis of the temporal variation of interferograms the time dependences of the plasma torch front motion velocity at different directions of the external electric field strength vector were calculated. The inerferograms also show that electric breakdown leads to the spasmodic increase of electron density of plasma plume. A plasma bubble is formed in the hole of the second electrode, within which the electron density exceeds 10^{20} cm^{-3} , and this means full ionization of plasma in the plume. This leads to the effective absorption of laser radiation by plasma torch and to the shielding of the target from the laser radiation

Keywords: pulsed laser radiation; external electric field; electric breakdown; light-detonation complex; shielding.

Введение

На сегодняшний день лазерные технологии широко проникли в нашу жизнь, поскольку они являются эффективными, а главное, результативными методами

Большой интерес вызывает изучение процессов в образующимся у поверхности облучаемого образца пароплазменном облаке, так как они самым существенным образом влияют на ход обработки материала, его механические, термодинамические и другие характеристики.

Целью данной работы является исследование влияния электрических полей различной напряженности (от 0 до 10^6 В/м) на пространственную и временную

эволюцию лазерной плазмы, возникающей при воздействии миллисекундных лазерных импульсов на поверхности металлов (медь, алюминий, олово, свинец).

1. Экспериментальная установка и экспериментальные результаты

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки, использованной в данной работе.

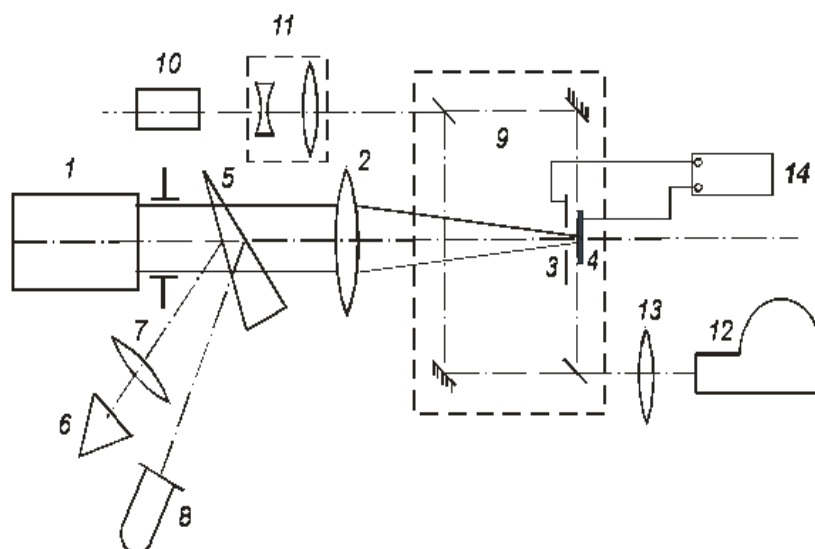


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В качестве источника излучения, воздействовавшего на металлический образец, использовался рубиновый лазер ГОР-100М (длина волны $\lambda = 0.694 \mu\text{м}$), работавший в режиме свободной генерации. Длительность воздействовавшего на мишень импульса составляла ~ 1.2 мс. Излучение лазера ГОР-100М 1, пройдя через фокусирующую систему 2, направлялось через отверстие в электроде 3 на образец 4, который сам являлся вторым электродом. Образец 4 располагался в воздухе при давлении 10^5 Па. В качестве фокусирующих использовались как однолинзовые, так и двухлинзовые системы, что позволяло строить изображение диафрагмы на поверхности образца 4 в виде пятна с резкими краями (диаметр варьировался в ходе экспериментов от 1 до 2 мм), что, в свою очередь, обеспечивало изменение плотности потока излучения q от 10^6 до 10^7 Вт/см². Часть ($\sim 4\%$) лазерного излучения (далее – ЛИ) направлялась передней гранью стеклянного клина 5 в измеритель энергии ИМО-2Н 6, входной зрачок которого был расположен в фокальной плоскости линзы 7. Энергия лазерных импульсов E_0 варьировалась в пределах от 5 до 60 Дж. Коаксиальный фотоэлемент ФЭК-14 8, сигнал с которого подавался на вход осциллографа С8-13, использовался для регистрации временной формы лазерного импульса. Напряжение на электроды 3, 4 подавалось от источника 14, созданного на базе умножителя напряжения УН 9/27-13 блока ТВС-110. Источник позволял изменять напряжение в пределах до 25 кВ и при этом поддерживать его стабильным во время проведения эксперимента.

Для изучения пространственной и временной эволюции лазерного факела в ходе воздействия ЛИ на образец использовался метод скоростной голографической киносъемки. Межэлектродный промежуток помещался в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера 9. Интерферометр освещался излучением рубинового лазера 10 ($\lambda = 0,694$ мкм), работавшего в режиме свободной генерации. Зондирующее излучение направлялось в коллиматор 11, позволявший получать параллельный световой пучок диаметром до 3 см, что позволило наблюдать за развитием пароплазменного облака. Интерферометр был состыкован со скоростной фоторегистрирующей камерой СФР-1М 12, плоскость фотопленки в которой была сопряжена с меридиональным сечением воздействующего на образец лазерного луча при помощи объектива 13. Описанная схема позволяла регистрировать развернутые во времени голограммы сфокусированного изображения лазерного факела. Полученные отдельные кадры голограмм обеспечивали временное разрешение не хуже 0,8 мкс (время экспозиции одного кадра) и пространственное разрешение по полю объекта ≈ 50 мкм.

Смещение интерференционных полос на интерферограмме и изменение показателя преломления связаны между собой интегральным уравнением Абея. Определив поле показателя преломления плазмы $n(z, r)$, можно рассчитать и поле концентрации электронов:

$$N_e(z, \rho) = -2\pi t_e c^2 (n(z, \rho) - 1) / e^2 \lambda^2 = -0,233 \times 10^{14} \frac{n(z, \rho) - 1}{\lambda^2} \text{ см}^{-3}.$$

На основании обработки интерферограмм получены данные по распределению плотности свободных электронов плазмы испаренного металла в различные моменты времени. Несмотря на то, что распределение энергии по пятну фокусировки ЛИ неравномерно, линии равной концентрации электронов имеют практически гладкий вид, что свидетельствует об относительно однородной ионизации паров эродированного вещества.

Существенно, что, несмотря на значительное увеличение во времени объема плазменного образования, средняя плотность электронов в факеле остается практически неизменной и даже несколько увеличивается, что может быть связано как с постоянным увеличением массы вынесенного вещества, так и с вторичной ионизацией плазмы ЛИ. Отметим, что наличие внешнего электрического поля слабо влияет на концентрацию электронов в лазерном факеле.

Интерферограммы, представленные на рис. 2, показывают, что уже упомянутый электрический пробой, происходящий при достижении плазменного облака электрода 3, приводит к взрывному росту плотности электронов в плазменном образовании. В отверстии электрода 3 образуется плазменный сгусток, в пределах которого интерференционные полосы сливаются, и их невозможно разделить. Это означает, что рефракция в плазменном сгустке отличается не менее чем на 10^{-3} от первоначальной (в невозмущенной среде). В нашем случае это возможно, только если плотность электронов в рассматриваемом сгустке превышает 10^{20} см^{-3} , что означает полную ионизацию продуктов эрозии в плазменном обра-

зовании. Это приводит к эффективному поглощению лазерного излучения плазменным факелом и, как следствие, к экранировке мишени от воздействующего излучения. Интерферограммы (рис. 2) также показывают, что плазменный сгусток перемещается со скоростью, превышающей скорость звука, от электрода Z в наплавлении, противоположном направлению распространения воздействующего на мишень лазерного излучения. Это говорит о возникновении светодетонационного комплекса, что является типичным для таких значений плотности электронов.

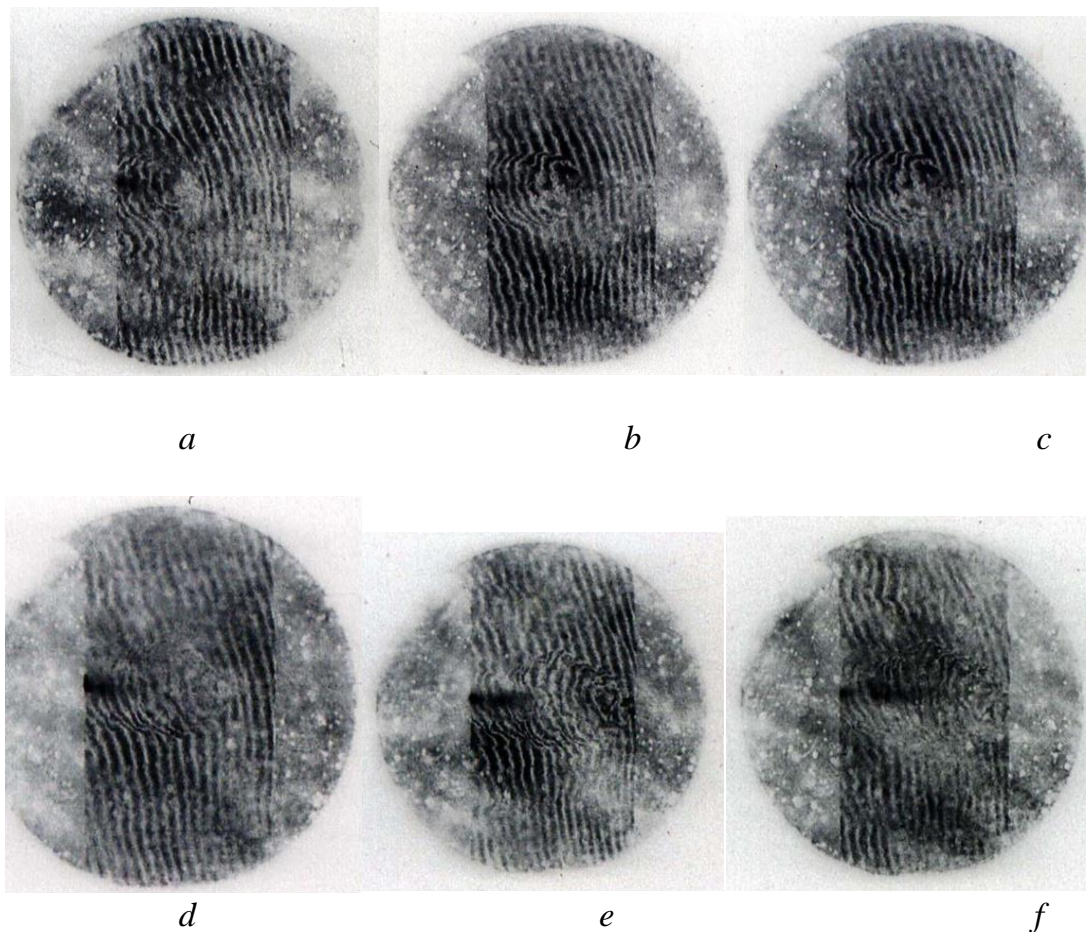
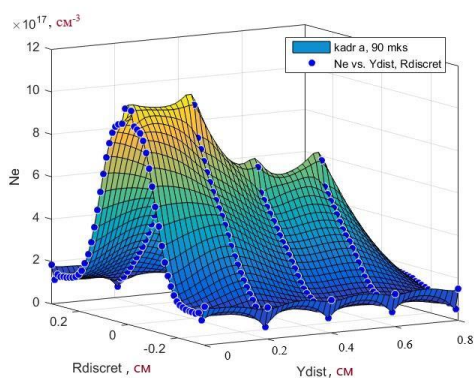
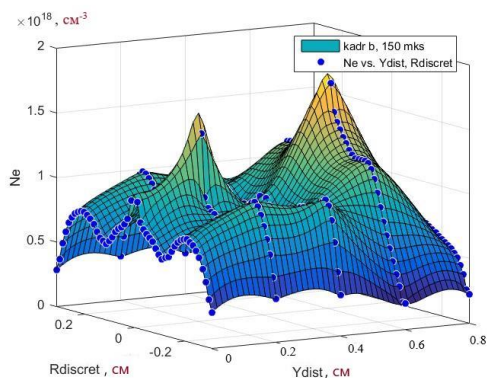


Рис. 2. Интерферограммы сгустка лазерной плазмы, наблюдаемого после электрического пробоя. Интерферограммы получены через 90 (a), 150 (b), 270 (c), 360 (d), 450 (e), 510 (f) микросекунд после начала лазерного воздействия на свинцовый образец

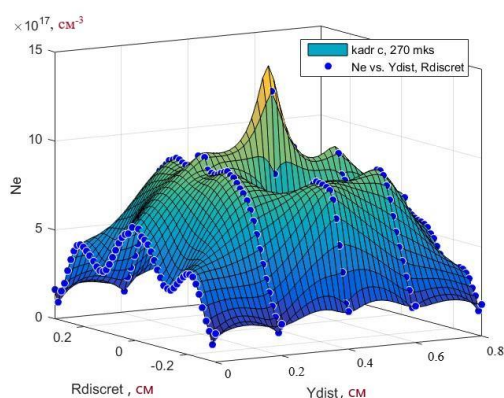
На рис. 3 представлена эволюция плотности электронов в лазерном факеле левее (см. рис. 1) электрода Z после электрического пробоя. Существенно, что движение электронов имеет вид пульсаций, а не ламинарного течения при сохранении практически неизменной плотности. Вероятно, это связано с отражением плазменного потока как от светодетонационного фронта, так и от электрода Z .



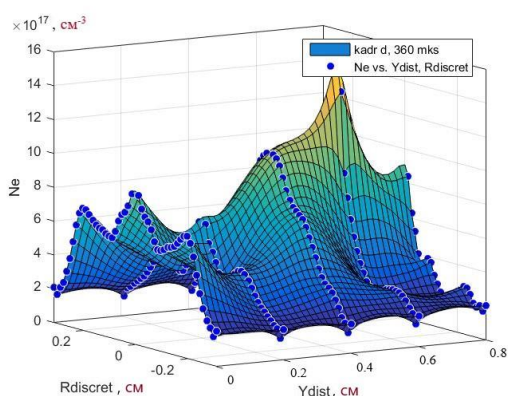
a



b



c



d

Рис. 3. Распределение плотности электронов за электродом 3 через 90 (*a*), 150 (*b*), 270 (*c*), 360 (*d*) микросекунд после начала лазерного воздействия на свинцовый образец. N_e – плотность электронов, cm^{-3} ; Y_{dist} – расстояние вдоль направления воздействия лазерного излучения, см; R_{discret} – расстояние от оси воздействующего лазерного излучения, см

Заключение

Показано, что изменения в характере эволюции параметров плазменного облака, формирующегося при воздействии лазерного излучения со средней плотностью потока $\sim 10^6$ Вт/см² на поверхность металлического образца в присутствии и в отсутствии внешнего электрического поля, является скорее количественным, чем качественным.

Незначительность указанных отличий наблюдаются только на начальной стадии развития плазменного облака. После того, как пароплазменное образование достигает электрода 3, происходит электрический пробой. Электрический пробой приводит к взрывному возрастанию плотности электронов и температуры плазмы и к началу эффективного поглощения лазерного излучения плазменным факелом.