

ПРОЦЕССЫ КОНДЕНСАЦИИ В ПЛАЗМЕННЫХ ФАКЕЛАХ РЬ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В.К. Гончаров¹⁾, К.В. Козадаев²⁾, Д.В. Щегрикович²⁾

¹⁾НИУ Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Савченко БГУ
ул. Курчатова, 7, Минск 220108, Беларусь

²⁾Факультет радиофизики и компьютерных технологий БГУ, ул. Курчатова, 5, Минск 220108,
Беларусь тел: +375-17-2095836, e-mail: kozadaeff@mail.ru

С помощью методики лазерного зондирования оценена скорость переднего фронта лазерно-плазменного факела при воздействии на свинцовую мишень интенсивных наносекундных лазерных импульсов. Определены временные зависимости поглощенной и рассеянной компонент зондирующего излучения для эрозионных лазерных факелов свинца. На основании результатов исследования сделан вывод о конденсационной природе процесса формирования жидкокапельной фазы материала свинцовой мишени при данных условиях воздействия.

Введение

Лазерные технологии обработки металлов в настоящее время приобрели чрезвычайно широкое распространение. При этом их дальнейшее развитие невозможно без детального понимания процессов, протекающих при взаимодействии мощного лазерного излучения с металлическими материалами. Несмотря на свою полувековую историю, лазерная физика до сих пор содержит немало «белых областей». Примером этого могут служить режимы обработки металлов наносекундными импульсами высокой (>10⁸ Вт/см²) плотности мощности.

Основная часть

Процессы эрозии металлических мишеней при воздействии наносекундных (10-30 нс) лазерных импульсов высокой плотности мощности (10⁸ – 10¹⁰ Вт/см²) качественно отличаются как от случая миллисекундных (и длительнее) импульсов умеренной плотности мощности (10⁵ – 10⁸ Вт/см²) [1-3], так и от воздействия ультракоротких фемто- и пикосекундных импульсов сопоставимой плотности мощности [4-6]. Однако прослеживается значительное сходство характера протекания процессов формирования и эволюции плазменного образования по сравнению с режимом воздействия импульсов высокой плотности мощности с субмикросекундной длительностью (~100 нс) [6-8].

Так, на основании исследований закономерностей лазерной эрозии металлов субмикросекундными высокоинтенсивными импульсами излучения [6-8] можно сделать вывод о том, что через ~50 нс после начала лазерного воздействия (время, сравнимое с длительностью переднего фронта действующего импульса) в приповерхностной области мишени формируется интенсивно светящееся плазменное образование. Далее оно начинает распространяться в направлении внешней среды, поглощая за счет обратного тормозного эффекта практически всю энергию задней части фронта действующего лазерного импульса, как следствие, значительно разогреваясь.

Характерная скорость распространения плазменного образования в начале составляет 7–20 км/с в зависимости от типа металлической мишени.

После спада интенсивности лазерного воздействия начинается достаточно медленное остывание факела преимущественно за счет адиабатического разлета плазмы, о чем можно судить по некоторому запаздыванию снижения свечения факела по отношению к заднему фронту действующего импульса. При этом в структуре экстинкции зондирующего излучения появляется рассеянная компонента, что свидетельствует о формировании внутри факела локальных неоднородностей плазмы, которые в этот момент определяют пропускание факелом зондирующего излучения.

В дальнейшем, спустя 2–2.5 мкс от начала воздействия, процессы поглощения зондирующего излучения опять начинают превалировать над рассеянием при общем низком уровне потерь в факеле, что говорит о начале мелкодисперсного каплеобразования за счет конденсации плазменного облака. Этот процесс продолжается сравнительно длительное время (~300–400 мкс) после воздействия и в результате приводит к возникновению над поверхностью мишени потоков наноразмерных частиц обрабатываемого металла.

В данной работе приведены результаты исследования плазменных факелов свинца, формирующихся под действием наносекундных (20 нс) лазерных импульсов высокой плотности мощности (10⁸ – 10¹⁰ Вт/см²), генерируемых лазерной установкой Nd:YAG (Lotis 2137) на длине волны 1064 нм.

Исследование прозрачности ЭЛФ свинца для зондирующего излучения показало значительное увеличение этой характеристики для всех изучаемых металлов по сравнению со случаем более энергетичных импульсов длительности 100 нс [7]. Так, потери зондирующего излучения при прохождении на высоте 1 мм от поверхности мишени через ЭЛФ свинца при интенсивности 10⁹ Вт/см² действующего импульса длительности 20 нс (характеризующегося наиболее плотным плазменным образованием) в пике не превышают 20 %, тогда как в

аналогичном случае импульсов длительности 100 нс [7] экстинкция зондирующего излучения доходила до 80%.

По значению временной задержки между минимумами прозрачности ЭЛФ на различной высоте зондирования над поверхностью мишени (например, 1 и 2 мм) можно оценить начальную скорость распространения плазменного фронта. Результаты этого исследования показывают, что характерные значения начальной скорости переднего фронта ЭЛФ свинца составляет 8 км/с. Следует отметить хорошее соответствие полученных данных результату [7] (для импульсов длительностью 100 нс), что может говорить об отсутствии влияния длительности переднего фронта воздействующего импульса на начальную скорость лазерноиндуцированного плазменного образования при действии наносекундных импульсов.

Исследования скорости движения переднего фронта ЭЛФ свинца производились для более широкого круга расстояний до поверхности мишени (1-5 мм), что позволило определить зависимость скорости продвижения плазменного образования при удалении от поверхности металла (см. рис. 1). Характерный вид этих кривых свидетельствует об адиабатическом охлаждении ЭЛФ, формирующихся при интенсивном наносекундном воздействии. При этом начальное значение скорости ЭЛФ при увеличении интенсивности воздействия несколько возрастает и в дальнейшем медленнее снижается. Это говорит о существенном возрастании параметров лазерной плазмы при увеличении плотности мощности наносекундных импульсов до 10^9 Вт/см².

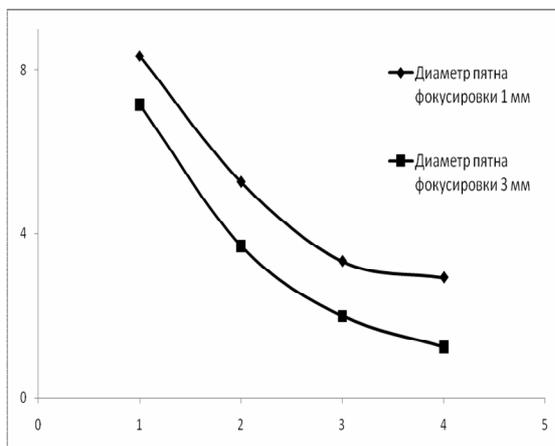
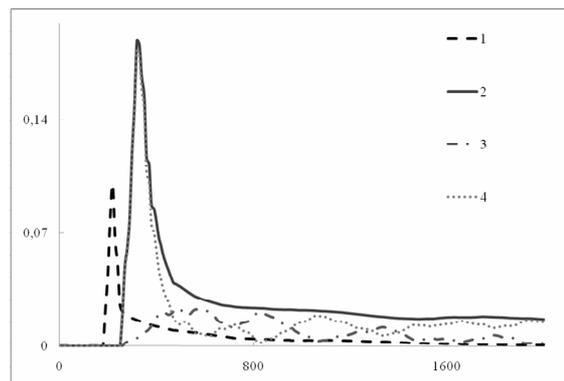


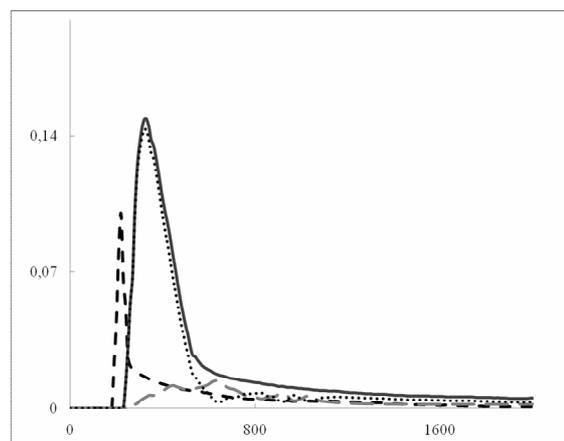
Рис. 1. Зависимость скорости продвижения плазменного образования (в км/с) от расстояния до поверхности металла (в мм) для плотности мощности 10^9 Вт/см² (диаметр фокусировки 1 мм) и 10^8 Вт/см² (диаметр фокусировки 3 мм)

Для изучения структуры экстинкции зондирующего излучения в плазменном образовании с разрешением во времени регистрировалась зависимость его рассеяния от времени на различных расстояниях от поверхности мишени (1 и 2 мм). Это позволило

разделить потери зондирующего излучения за счет поглощения и рассеяния, обусловленные различными физическими процессами. Из рис. 2а видно, что действительно в первые 150 нс после начала воздействия на свинцовую мишень практически все потери зондирующего излучения в ЭЛФ определяются поглощением в плазме (за счет эффекта обратного тормозного поглощения на носителях заряда [7]). Далее в структуре экстинкции зондирующего излучения появляется рассеянная компонента, она заметно возрастает, формируя отчетливый максимум в районе 200 нс после начала воздействия. В дальнейшем наблюдается немонотонное снижение значения данного параметра.



а



б

Рис. 2. Зависимости характеристик: 1- интенсивность воздействующего импульса (в отн. ед.), 2- общие потери зондирующего излучения в ЭЛФ (в отн. ед.), 3- потери зондирующего излучения в ЭЛФ на рассеяние (в отн. ед.), 4- потери на поглощение зондирующего излучения в ЭЛФ (в отн. ед.) от времени (в нс) для плотности мощности воздействующего импульса 10^9 Вт/см² (а) и 10^8 Вт/см² (б)

Подобную форму временной зависимости рассеянной компоненты можно объяснить началом процесса конденсации в ЭЛФ [7]. Действительно в рассеяние зондирующего излучения вносят вклад два конкурирующих процесса: возрастающее рассеяние на локальных неоднородностях остывающей плазмы

(флуктуациях плотности) [9] и адиабатический разлет плазмы, снижающий рассеяние за счет уменьшения количества материала мишени в зоне зондирования.

Приблизительно через 1,5 мкс после начала воздействия плазма ЭЛФ достаточно «остывает» и разлет практически прекращается. С этого момента проявляется устойчивое превалирование процессов поглощения над рассеянием, что можно объяснить началом стабильного каплеобразования за счет конденсационных процессов [7]. Результаты исследования динамики рассеянной компоненты и экстинкции зондирующего излучения для случая меньшей интенсивности (10^8 Вт/см²) воздействующего импульса (рис. 2 б) показывают, что все описанные закономерности качественно схожи с описанными выше, наблюдается лишь небольшая разница в их максимальных значениях (интенсивность рассеянной компоненты и общие потери несколько снижены), что говорит лишь о большей прозрачности плазменного образования.

Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют установить основные закономерности формирования ЭЛФ свинца при их облучении интенсивными (10^8 Вт/см² - 10^9 Вт/см²) 20-ти нс импульсами излучения. Показано, что применение для лазерной обработки свинца наносекундных лазерных импульсов с интенсивностью 10^8 Вт/см² более эффективно, поскольку в этом случае ЭЛФ практически не

взаимодействует с падающим излучением вследствие высокой прозрачности формирующегося плазменного образования. В случае повышения плотности мощности излучения значительная часть энергии действующего импульса не доходит до поверхности мишени и расходуется на повышение параметров образующейся плазмы. Протекание конденсационных процессов в ЭЛФ, образующихся при данных условиях воздействия, делает лазерную эрозию привлекательной с точки зрения реализации высокопроизводительных процессов формирования наноразмерных частиц металлов.

Список литературы

1. Анисимов С.И. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
2. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
3. Гончаров В.К. // ИФЖ. – 1992. – 5. – С.665.
4. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. // УФН – 2002. – 3. – С. 301.
5. Byskov-Nielsen J., Savolainen J.-M., Christensen M. S., Balling P. // Appl. Phys. A. – 2011. – 103. – С. 447.
6. Е.Ю.Локтионов, А.В.Овчинников, Ю.Ю. Протасов, Д.С. Ситников // ЖПС. – 2010. – 4. – С. 604.
7. Гончаров В.К., Козадаев К.В., Щегрикович Д.В. // ИФЖ. – 2011. – 4. – С. 723
8. Гончаров В.К., Козадаев К.В. // ИФЖ. – 2010. – 1. – С. 80.
9. Kumar N., Dash S., Tyagi A.K., Baldev R. // Sadhana. – 2010. – 4. – Р. 493.

THE CONDENSATION PROCESSES IN Pb PLASMA JETS UNDER ACTION OF NANOSECOND LASER PULSES AT ATMOSPHERIC PRESSURE

V.K. Goncharov¹⁾, K.V. Kozadayev²⁾, D.V. Shcherykovich²⁾

¹⁾A.N. Sevchenko Scientific-Research Institute of Applied Physics Problems, Kurchatov str. 7, Minsk, Belarus, 220108,

²⁾Faculty of radio physics and computer technologies of BSU, Kurchatov str. 5, Minsk, Belarus, 220108, e-mail: kozadaeff@mail.ru

By the method of laser probing the velocity of Pb laser jet front under acting of powerful 20 ns pulses of YAG:Nd laser was estimated. The peculiar properties of probing irradiation absorption and scattering processes were established for application of nanosecond pulses with high level of power density on Pb targets. The main mechanism of Pb drop-liquid phase formation was defined for mentioned conditions of laser acting as condensation process.