

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ТФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 86, № 4
Vol. 86, No. 4

ИЮЛЬ–АВГУСТ
JULY–AUGUST

2013

УДК 621.373.826.004.14

*В. К. Гончаров, К. В. Козадаев, В. В. Макаров, Д. В. Щегрикович***ПРОТЕКАНИЕ ЭРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ МЕТАЛЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Методом лазерного зондирования определены временные зависимости коэффициента прозрачности и интегрального свечения эрозионных факелов металлов, возникающих при воздействии на них интенсивных наносекундных лазерных импульсов, а также рассеянной факелом компоненты зондирующего излучения. На основе результатов лазерного зондирования сделан вывод о конденсационной природе процесса формирования жидкокапельной фазы вблизи поверхности исследованных металлов в рассматриваемых условиях лазерного воздействия на них.

Ключевые слова: лазерная эрозия металлов, наносекундные импульсы оптического излучения, конденсированная фаза материала мишени.

Введение. На протяжении последних 50 лет проблематика взаимодействия лазерного излучения с веществом вызывает все возрастающий интерес исследователей, о чем свидетельствует экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных этой теме. В настоящее время существует большой выбор лазерных систем, позволяющих генерировать излучение с различными энергетическими, спектральными, поляризационными и временными характеристиками. При этом направленность научных исследований, как правило, задается потребностью развития определенных технологий лазерной обработки материалов для решения конкретных производственных задач. Примером таких задач является лазерный синтез наноразмерных металлических структур в условиях обычной атмосферы [1–3]. Для решения этой технологической задачи перспективно применение современных серийно производимых лазерных установок, позволяющих генерировать в частотном режиме лазерные импульсы длительностью ~ 10 нс с высокой плотностью мощности (10^8 – 10^{10} Вт/см²).

Данная работа посвящена исследованию процессов, протекающих в первые микросекунды существования эрозионных лазерных факелов (ЭЛФ), формируемых вблизи поверхности металлических мишеней наносекундными лазерными импульсами высокой плотности мощности.

Эксперимент. Для изучения динамики ЭЛФ металлов с высоким временным разрешением была использована экспериментальная лазерная установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Функционально установку можно разделить на блоки: генерации 2 и контроля параметров воздействующих импульсов 5–9, генерации зондирующих импульсов 16–20, 26, регистрации компонент зондирующего излучения 3, 4, 10–15, 21–25 и синхронизации 1.

Блок генерации и контроля параметров воздействующего излучения представлен серийной лазерной установкой LOTIS 2137 2, сопряженной с фотодиодом 8 и калориметром 9. Характерная временная форма импульса воздействующего излучения приведена на рис. 2, а. Длительность этого импульса на полувысоте составляет 20 нс, а энергия — 300 мДж, что при фокусировке с помощью линзы 6 в пятно диаметром 1 мм позволяет получать плотность мощности ~ 1 ГВт/см².

Блок генерации зондирующего излучения состоит из рубинового лазера 19 на основе стандартного блока "Накачка 3000М", функционирующего в режиме квазистационарной генерации, что достигается при помощи конфокальных резонаторов 18, 20 и значительного превышения коэффициента усиления над потерями. Фрагмент временной формы зондирующего импульса представлен на рис. 2, б. Пиковая плотность мощности зондирующего излучения доходит до 10^4 Вт/см². Порядок данной величины ограничен, с одной стороны, нежелательностью возмущения исследуемой среды зондирующим импульсом, а с другой — требованием минимального уровня интенсивности, необходимого для регистрации рассеянной компоненты.

Основу блока регистрации компонент зондирующего излучения составляют фотодиоды ФД 21-КП 21, 24 и ФЭУ SPM Micro 10020 SensL 22, объединенные с персональным компьютером 25 посредством многоканального

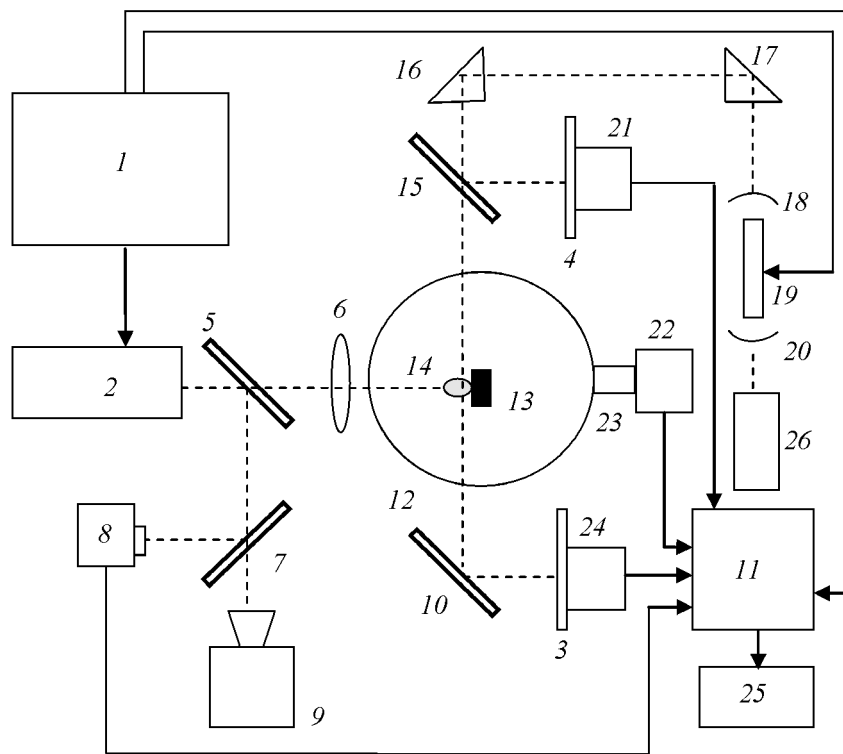


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 — система синхронизации; 2 — неодимовый лазер; 3 и 4 — интерференционные фильтры ($\lambda = 694.3$ нм); 5, 7, 10 и 15 — ответвляющие плоскопараллельные кварцевые пластинки; 6 — подвижная линза; 8, 21 и 24 — фотодиоды; 9 — калориметр; 11 — АЦП; 12 — интегрирующая сфера; 13 — металлическая мишень; 14 — эрозионный лазерный факел; 16 и 17 — поворотные призмы; 18–20 — рубиновые лазеры с конфокальным резонатором; 22 — ФЭУ; 23 — система оптических фильтров; 25 — персональный компьютер; 26 — юстировочный гелий-неоновый лазер

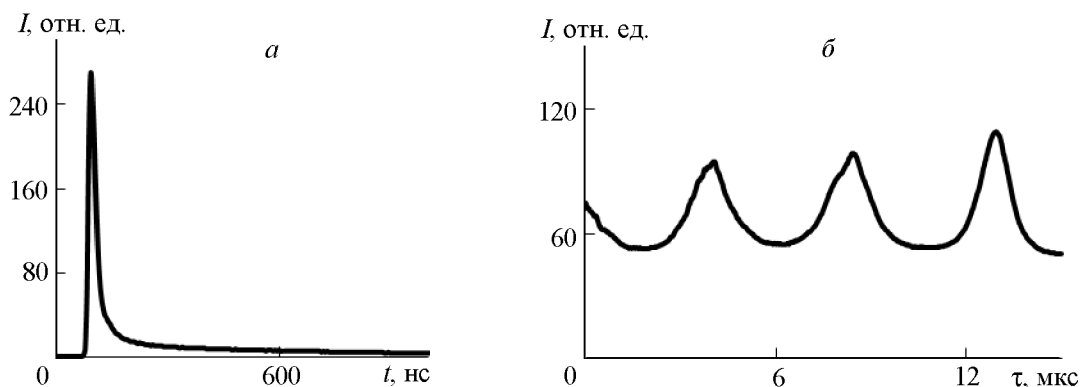


Рис. 2. Временные зависимости интенсивностей лазерных импульсов воздействующего (а) и зондирующего (б) излучений

цифрового осциллографа В422 11, который позволяет достичь разрешения во времени до 10 нс. Для нивелирования влияния воздействующего излучения и свечения ЭЛФ на процесс регистрации компонент зондирующего импульса применяются интерференционные ($\lambda = 694.3$) фильтры 3, 4, 23.

Для обеспечения слаженной работы всех составных частей установки использован многоканальный генератор задержанных импульсов G200P 1, вырабатывающий синхронизационные импульсы с различной задержкой по времени для каждого из блоков.

С помощью описанной установки возможно исследование с высоким временным разрешением динамики следующих характеристик эрозионных процессов в приповерхностной области металлов:

- а) интегрального по спектру свечения ЭЛФ (с учетом спектральной чувствительности фотоприемника);
- б) прозрачности ЭЛФ для зондирующего излучения в зависимости от высоты зондирования;
- в) рассеянной факелом компоненты зондирующего излучения (посредством применения интегрирующей сферы 12) в зависимости от высоты зондирования.

В качестве металлических мишеней были выбраны массивные пластины из свинца, цинка, меди, никеля, а также серебра, золота и платины. Металлы первой группы (Pb, Zn, Cu, Ni) за счет существенных различий в оптических и теплофизических характеристиках [4] позволяют говорить о закономерностях процессов лазерной эрозии в целом для металлов [5, 6]. Исследование материалов второй группы (Ag, Au, Pt) представляет практический интерес для развития технологии лазерного синтеза наноразмерных металлических структур в условиях обычной атмосферы [1]. Гладкая поверхность мишеней была модифицирована продольными царапинами глубиной 30–50 мкм с целью максимизации выноса материала при его эрозии под воздействием лазерного излучения [6, 7].

Обсуждение результатов. Характер разрушения металлических мишеней при воздействии на них 20 наносекундных лазерных импульсов высокой плотности мощности (10^8 – 10^{10} Вт/см²) качественно отличается как от эрозии, вызванной миллисекундными и более длительными импульсами излучения умеренной плотности мощности (10^5 – 10^8 Вт/см²) [8–11], так и от процесса разрушения металлов под действием фемто- и пикосекундных импульсов излучения высокой плотности мощности [12–14]. Однако прослеживается значительное сходство характера протекания эрозии поверхности металлов и формирования плазменного факела при воздействии на них 20 наносекундных лазерных импульсов с аналогичными процессами эрозии под действием импульсов излучения высокой плотности мощности с длительностью ~100 нс [5–7].

Здесь и далее в качестве примера будут рассматриваться зависимости, полученные для свинцовых мишеней. Однако следует отметить, что приводимые общие выводы основаны на обработке массива экспериментальных данных для всех семи исследованных металлов.

Результаты исследования временной формы прозрачности ЭЛФ для зондирующего излучения и интегральной светимости факела, формирующегося при воздействии импульсов длительности 20 нс с плотностью мощности 10^8 и 10^9 Вт/см² на свинцовую мишень, приведены на рис. 3.

Изучение динамики интегрального свечения всех обсуждаемых металлов показало, что моменты максимальной светимости ЭЛФ при плотностях мощности воздействующего излучения 10^8 и 10^9 Вт/см² задержаны по отношению к пику интенсивности лазерного импульса на 20–60 нс. Это говорит о том факте, что весь передний фронт действующего излучения беспрепятственно доходит до поверхности мишени. Форма временной зависимости свечения ЭЛФ всех исследованных металлов при плотности мощности лазерного импульса 10^8 Вт/см², как правило, с небольшой задержкой повторяет контур действующего лазерного импульса. При

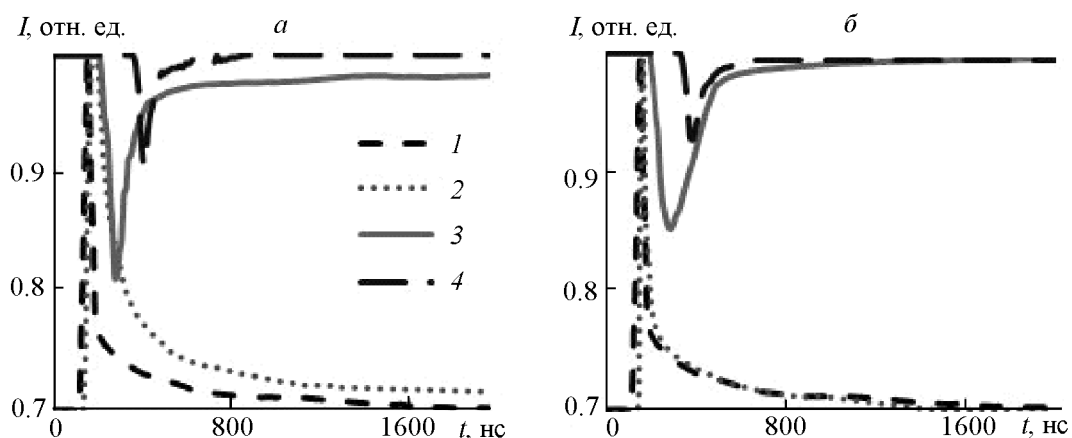


Рис. 3. Временные зависимости интенсивности воздействующего импульса (1), интегральной светимости ЭЛФ (2), зондирующего импульса при $h = 1$ мм (3), зондирующего импульса при $h = 2$ мм (4) при воздействии 20 наносекундных импульсов с плотностью мощности 10^9 (а) и 10^8 Вт/см² (б) на свинцовую мишень

увеличении плотности мощности лазерного излучения от 10^8 до 10^9 Вт/см² наблюдается заметное увеличение интегральной светимости ЭЛФ, сопровождающееся существенным затягиванием заднего фронта динамики свечения, что свидетельствует о значительном увеличении максимальной плотности плазменного образования по сравнению со случаями более низкой интенсивности действующих оптических импульсов. Так, для удобства восприятия пики временных зависимостей свечения ЭЛФ свинца на рис. 3, *a* и *б* отображены на одном уровне, однако действительная пиковая интенсивность свечения ЭЛФ для импульса с плотностью мощности 10^9 Вт/см² в три раза выше, чем для импульса с плотностью мощности 10^8 Вт/см².

Исследование прозрачности ЭЛФ для зондирующего излучения показало значительное увеличение этой характеристики для всех изучаемых металлов по сравнению со случаем более энергетичных импульсов длительностью 100 нс [5]. Так, потери зондирующего излучения при его прохождении через ЭЛФ свинца на высоте 1 мм от поверхности мишени не превышают 20% (см. рис. 3, *a*) даже при интенсивности 20 наносекундного воздействующего импульса 10^9 Вт/см² (что характеризуется наиболее плотным плазменным образованием), тогда как в аналогичном случае воздействия на металлы 100 наносекундных импульсов [5] потери зондирующего излучения в пике доходили до 80%. Низкие уровни потерь зондирующего излучения характерны для ЭЛФ всех исследованных металлов при воздействии импульсов длительностью 20 нс, их максимальная величина составляет 10–15% для легкоплавких свинца и цинка и 3–10% для остальных металлов.

Формы временных зависимостей интегральной светимости ЭЛФ и его прозрачности для зондирующего излучения на высоте 1 мм (для интенсивности воздействующих импульсов 10^8 – 10^9 Вт/см²) имеют существенную особенность: пик интегральной светимости ЭЛФ задержан по отношению к воздействию всего на 20–60 нс (в зависимости от типа металла и плотности мощности импульса воздействия), тогда как минимум прозрачности — уже на 120–200 нс. Это может свидетельствовать о том, что основное высвечивание ЭЛФ при описываемых условиях происходит до достижения плазменным фронтом высоты 1 мм, тогда как в случае действия 100 наносекундных импульсов излучения рассматриваемые зависимости достигают экстремумов практически синхронно [5].

По значению временной задержки между минимумами прозрачности ЭЛФ на различной высоте над поверхностью мишени (1 и 2 мм) можно оценить начальную скорость распространения плазменного фронта. Результаты этого исследования представлены в таблице. Они показывают, что характерные значения начальной скорости переднего фронта ЭЛФ исследуемых металлов составляют 4–15 км/с. Следует отметить хорошее соответствие полученных данных результатам [5] для импульсов длительностью 100 нс, что может говорить об отсутствии влияния длительности переднего фронта наносекундных импульсов на начальную скорость индуцированных ими плазменных образований.

Исследования скорости движения фронта ЭЛФ свинца проводились для более широкого диапазона высот зондирования относительно поверхности мишени (1–5 мм), что позволило определить скорость продвижения переднего фронта плазменного образования в зависимости от его удаленности от поверхности металла (см. рис. 4). Характерный вид полученных кривых свидетельствует об адиабатическом охлаждении ЭЛФ, формирующихся при интенсивном воздействии наносекундного излучения. При этом начальное значение скорости ЭЛФ при увеличении интенсивности воздействия до 10^9 Вт/см² несколько возрастает и в дальнейшем медленнее снижается. Это опять же говорит о существенном возрастании параметров лазерной плазмы при увеличении плотности мощности наносекундных импульсов до 10^9 Вт/см².

Оценка начальной скорости продвижения переднего фронта ЭЛФ

Металл	Временной интервал между моментами достижения ЭЛФ расстояний 1 и 2 мм от поверхности мишени, нс	Оценочная величина начальной скорости плазменного образования, км/с
Серебро	140	7.1
Золото	270	3.7
Платина	220	4.5
Никель	160	6.3
Медь	130	7.7
Цинк	70	14.3
Свинец	120	8.3

Для изучения структуры экстинкции зондирующего излучения в плазменном образовании в различные моменты времени, помимо динамики потерь, регистрировалась зависимость его рассеяния от времени и от расстояния до поверхности мишени (1 и 2 мм), что позволило разделить потери зондирующего излучения за счет поглощения и рассеяния, обусловленные принципиально различными процессами в плазме. Из рис. 5, *а* 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 [5]). Далее в структуре экстинкции зондирующего излучения появляется рассеянная компонента, которая быстро возрастает и достигает максимума примерно через 200 нс после начала воздействия. В дальнейшем эта компонента немонотонно уменьшается. Такую динамику рассеянной компоненты можно объяснить началом процесса конденсации в ЭЛФ [5]. Действительно, в рассеяние зондирующего излучения вносят вклад два конкурирующих процесса: возрастающее рассеяние на локальных неоднородностях остывающей плазмы (флуктуациях плотности) [15] и адиабатический разлет плазмы, снижающий рассеяние за счет уменьшения количества материала мишени в зоне зондирования.

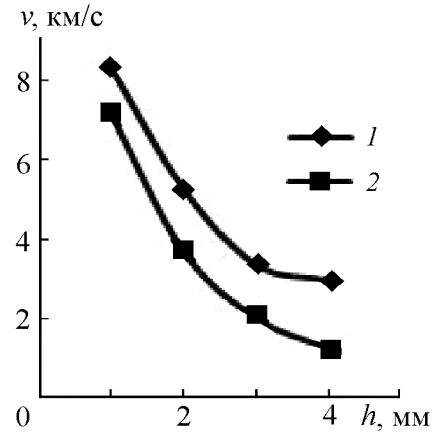


Рис. 4. Зависимость скорости переднего фронта ЭЛФ от плотности мощности воздействующего импульса: 1 — 10^9 Вт/см²; 2 — 10^8

Приблизительно через 1.5 мкс после начала воздействия плазма ЭЛФ достаточно "остывает" и ее разлет практически прекращается. С этого момента наблюдается устойчивое превалирование процессов поглощения над рассеянием, что можно объяснить началом стабильного каплеобразования за счет конденсационных процессов [5]. Результаты исследования динамики экстинкции зондирующего излучения и его рассеянной компоненты для случая меньшей интенсивности (10^8 Вт/см²) воздействующего импульса (рис. 5, *б*) показывают, что эти закономерности качественно схожи с описанными выше, наблюдается лишь небольшое снижение уровня их пиковых значений, что свидетельствует о большей прозрачности плазменного образования.

На основе исследованных закономерностей лазерной эрозии металлов наносекундными (20 нс) высокоинтенсивными (10^8 – 10^9 Вт/см²) импульсами излучения можно сделать вывод, что примерно через 20–60 нс (в зависимости от металла) после начала лазерного воздействия в приповерхностной области мишени формируется интенсивно светящееся плазменное образование. Лазерный факел распространяется в направлении внешней среды, при этом максимум высвечивания ЭЛФ для всех исследованных материалов происходил на высоте менее 1 мм. Характерная скорость распространения переднего плазменного образования на высоте 2 мм от

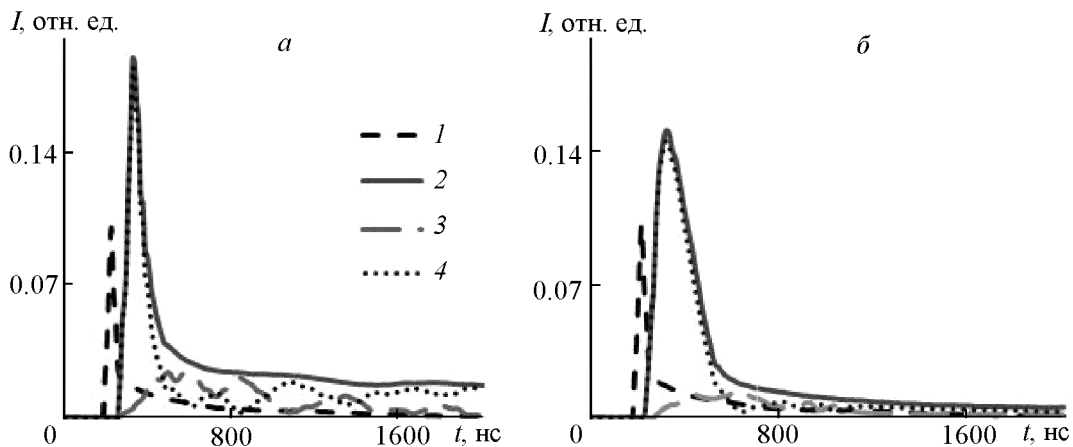


Рис. 5. Временные зависимости воздействующего импульса (1), общих потерь зондирующего излучения в ЭЛФ (2), потерь зондирующего излучения в ЭЛФ за счет рассеяния (3) и потерь зондирующего излучения в ЭЛФ за счет поглощения (4)

поверхности мишени составляет 4–14 км/с в зависимости от типа металлической мишени. Изучение величины скорости переднего фронта ЭЛФ в более широком диапазоне высот (2–5 мм) для свинцовой мишени показало экспоненциальное снижение этого параметра, что подтверждает модель адиабатического расширения ЭЛФ при интенсивном субмикросекундном лазерном воздействии [16].

После спада интенсивности лазерного воздействия начинается достаточно быстрое остывание факела преимущественно за счет разлета плазмы, о чем можно судить по некоторому запаздыванию снижения свечения факела по отношению к заднему фронту воздействующего импульса. При этом в случае низкой интенсивности (10^8 Вт/см²) воздействующего импульса форма задних фронтов действующего импульса и свечения ЭЛФ практически совпадает, что говорит о высоком уровне прозрачности плазменных образований и фактическом отсутствии его взаимодействия с падающим излучением (т. е. практически вся энергия импульса доходит до поверхности мишени). С увеличением плотности мощности лазерного импульса (до 10^9 Вт/см²) запаздывание спада свечения увеличивается с параллельным ростом его интенсивности. Это может свидетельствовать о возрастающем взаимодействии ЭЛФ с действующим излучением. В качестве наиболее вероятного механизма поглощения энергии заднего фронта воздействующего лазерного импульса может рассматриваться обратный тормозной эффект [17].

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 1–1.5 мкс от начала воздействия, процессы поглощения зондирующего излучения опять начинают превалировать над рассеянием при достаточно низком уровне потерь в факеле, что говорит о начале мелкодисперсного каплеобразования за счет конденсации плазменного облака [5]. Результаты предыдущих исследований [6] показывают, что этот процесс приводит к возникновению в приповерхностной области мишени наноразмерных частиц обрабатываемого металла.

Заключение. В результате проведенных исследований были установлены основные закономерности формирования ЭЛФ металлов при их облучении 20 наносекундными интенсивными (10^8 – 10^9 Вт/см²) импульсами лазерного излучения. Показано, что применение для лазерной обработки металлов наносекундных импульсов интенсивностью 10^8 Вт/см² наиболее 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 увеличение параметров образующейся плазмы (электронной температуры и плотности). Протекание конденсационных процессов в ЭЛФ, образующихся в данных условиях, делает лазерную эрозию привлекательной с точки зрения реализации высокопроизводительных процессов формирования наноразмерных частиц металлов.

Обозначения

h — расстояние между зондирующим излучением и поверхностью мишени, мм; I — относительная интенсивность излучения, отн. ед.; t и τ — время, нс и мкс; v — скорость движения плазменного фронта, км/с.

Литература

1. Goncharov V. K., Kozadaev K. V., and Shchegrikovich D. V. Investigation of noble metals colloidal systems formed by laser synthesis in air. *Advances in Optical Technol.* 2012. Article ID 907292. doi: 10.1155/2012/907292.
2. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Шиман Д. И., Щегрикович Д. В. Формирование и исследование оптических сред, содержащих золотые наночастицы. *Инженерно-физический журнал.* 2012. Т. 85, № 1. С. 38–42.
3. Goncharov V. K., Kozadaev K. V., and Shchegrikovich D. V. Laser synthesis of optical media with silver nanoparticles by nanosecond pulses in air. *Optical Memory Neural Networks (Information Optics).* 2011. Vol. 20, No. 4. Pp. 255–259.
4. Кикоин И. К. *Таблицы физических величин.* Москва: Атомиздат, 1976.
5. Гончаров В. К., Козадаев К. В., Щегрикович Д. В. Начало конденсации в эрозионных факелах металлов при высокоинтенсивном субмикросекундном лазерном воздействии. *Инженерно-физический журнал.* 2011. Т. 84, № 4. С. 723–728.
6. Гончаров В. К., Козадаев К. В. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов. *Инженерно-физический журнал.* 2010. Т. 83, №1. С. 80–84.
7. Козадаев К. В. Изменение рельефа металлических мишеней под действием субмикросекундных лазерных импульсов высокой плотности мощности. *Перспективные материалы.* 2011. № 6. С. 71–78.
8. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н. *Лазерная обработка материалов.* Москва: Машиностроение, 1975.
9. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. *Действие лазерного излучения большой мощности на металлы.* Москва: Наука, 1970.

10. Прохоров А. М., Конов В. И., Урсу И., Михэилеску И. Н. *Взаимодействие лазерного излучения с металлами*. Москва: Наука, 1988.
11. Гончаров В. К. Роль частиц материала мишени в динамике лазерного эрозионного факела. *Инженерно-физический журнал*. 1992. Т. 62, № 5. С. 665–684.
12. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции. *Успехи физ. наук*. 2002. Т. 172, № 3. С. 301–333.
13. Byskov-Nielsen J., Savolainen J.-M., Christensen M. S., and Balling P. Ultrashort pulse laser ablation of copper, silver and tungsten: experimental data and two-temperature model simulations. *Appl. Phys. A*. 2011. Vol. 103. Pp. 447–453.
14. Локтионов Е. Ю., Овчинников А. В., Протасов Ю. Ю., Ситников Д. С. Энергетическая эффективность фемтосекундной лазерной абляции тугоплавких металлов. *Журн. прикл. спектроскопии*. 2010. Т. 77, № 4. С. 604–611.
15. Минько Л. Я., Чивель Ю. А. Исследование характера начального разрушения металлов при импульсном лазерном воздействии. *Оптический журнал*. 1996. № 2. С. 60–64.
16. Kumar N., Dash S., Tyagi A.K., and Baldev R. Dynamics of plasma expansion in the pulsed laser material interaction. *Sadhana*. 2010. Vol. 35, No. 4. Pp. 493–511.
17. Бункин Ф. В., Казаков А. Е., Федоров М. В. Взаимодействие интенсивного оптического излучения со свободными электронами. *Успехи физ. наук*. 1972. Т. 107, № 4. С. 559–593.