

ЛИТЕРАТУРА

1. Терагерцовый спектрометрический комплекс с использованием фотопроводящих антенн и Yb:KYW лазера / А.М. Гончаренко [и др.] // Сборник научных трудов, IV Конгресс физиков Беларуси, 24-26 апреля, Минск, 2013. – С. 82–83.
2. Geladi P. Partial least-squares regression: a tutorial / P. Geladi, B.R. Kowalski // *Analytica Chimica Acta*. – 1986. – V. 185. – P.1–17.
3. Стандарт Американского общества специалистов по испытаниям материалов ASTM E 1655-05 ” Standard Practices for Infrared Multivariate Quantitative Analysis“ (СТ РК АСТМ Е 1655-2011” Стандартные методы по инфракрасному многомерному количественному анализу“)
4. Zornoza R. Near infrared spectroscopy for determination of various physical, chemical and biochemical properties in Mediterranean soils / R. Zornoza, C. Guerrero, J. Mataix-Solera, K. M. Scow, V. Arcenegui, J. Mataix-Beneyto // *Soil Biology & Biochemistry*. – 2008. – V. 40. – P.1923-1930.
5. Ходасевич М. Выбор спектральных переменных и повышение точности калибровки температуры методом проекции на латентные структуры по спектрам флуоресценции Yb³⁺ : CaF₂/ М. Ходасевич, В. Асеев // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – №. 124. – с. 748-752.

УДК 537.8

Н.В. Тарасенко¹, Н.Н. Тарасенко¹, В.Г. Корнев¹,
А.О. Радомцев¹; А.В. Буцень²
(¹Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, ²БГТУ, г. Минск)

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПЛАЗМА В ЖИДКОСТИ И ЕЕ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Импульсная лазерная абляция в жидкостях (ИЛАЖ) для получения коллоидных наночастиц (НЧ) широко изучается в последние десятилетия благодаря ряду перспективных преимуществ, среди которых: экологичность, простота реализации, возможная долговременная стабильность получаемых НП [1].

Недавние исследования показали важность начальной стадии плазмы и динамики кавитационных пузырьков в процессах, приводящих к зарождению и образованию НЧ в растворе [2].

Взаимодействие высокоинтенсивного импульсного лазерного излучения с твердотельной мишенью в жидкости приводит к образо-

ванию над поверхностью мишени плотной плазмы с быстро меняющимися параметрами. Плазма расширяется со сверхзвуковой скоростью, охлаждаясь в результате электронно-ионной излучательной рекомбинации и химических реакций. При этом длительность излучающей стадии лазерно-индуцированной плазмы относительно мала (как правило, несколько сотен наносекунд).

После затухания плазмы образуется полусферический кавитационный пузырь, состоящий из газообразных продуктов абляции и паров окружающей жидкости. Возникая вслед за лазерным импульсом и постоянно расширяясь, газовый пузырек достигает максимального размера через несколько сотен микросекунд (в зависимости от материала мишени и энергии лазерного импульса), а затем схлопывается.

Механизм образования НЧ после лазерной абляции твердой мишени в жидкости остается дискуссионным и недостаточно изученным. Со времени первых исследований в этой области обсуждались два основных механизма. Первый основан на зарождении и росте частиц в лазерном факеле; второй предполагает выброс капель из расплавленного слоя в жидкость.

Поскольку такие параметры лазерной плазмы, как концентрация компонентов и температура, напрямую влияют на процессы, приводящие к синтезу частиц, знание динамики эволюции состава лазерной плазмы важно для оптимизации условий получения наночастиц методом ИЛАЖ.

Важную роль в росте НЧ играет состав лазерной плазмы, образующейся при абляции (в частности, плотность атомов в газовой фазе), а также температура плазмы. Несмотря на сложную пространственно-временную структуру, высокую плотность и неоднородность лазерно-индуцированной плазмы, спектроскопическая диагностика представляется весьма информативной, но при этом требует измерений с высоким временным и пространственным разрешением.

В связи с этим важными и актуальными являются исследования, направленные на установление особенностей плазмообразования и определение параметров лазерно-индуцированной плазмы в жидкостях, выяснение влияния параметров плазмы на процессы роста наночастиц, являющиеся предметом настоящего исследования.

В настоящей работе для определения параметров лазерной плазмы в жидкости применена методика, основанная на регистрации и анализе спектров непрерывного излучения, ранее предложенная в [2]. По результатам спектроскопической диагностики рассмотрены особенности инициирования и эволюции лазерной плазмы серебряной мишени в воде в режиме генерации НЧ. С помощью изображений

плазмы с временным и спектральным разрешением в области пропускания узкополосных фильтров получена информация о пространственных распределениях параметров плазмы при различных временных задержках с момента образования плазмы.

В экспериментах в качестве источника для абляции использовался YAG:Nd-лазер (LOTIS ТП, модель S-2131D), работающий на частоте основной гармоники (1064 нм) с длительностью импульса 10 нс и частотой следования импульсов 10 Гц. Энергия лазерных импульсов могла варьироваться в диапазоне 20–80 мДж. Лазерное излучение после телескопа фокусировалось кварцевым конденсором на мишень, помещенную в кювету с кварцевыми окнами, заполненную дистиллированной водой.

Изображения плазмы снимались через интерференционные фильтры на длинах волн 486 и 550 нм с полной шириной на полувысоте 10 нм. Изображения плазмы получали с временным разрешением 10 нс. Полученные изображения качественно характеризуют структуру плазменного факела, иллюстрируя особенности пространственного распределения частиц плазмы в нем.

Непрерывный спектр излучения плазмы обусловлен двумя причинами: тормозным излучением свободных электронов в электрическом поле положительных ионов и излучением при захвате свободных электронов положительными ионами (рекомбинационное излучение).

Из-за сильной (экспоненциальной) зависимости интенсивности излучения от частоты свободное излучение дает наибольший вклад только в низкочастотной области спектра.

Распределение энергии в видимой области спектра при низких температурах полностью определяется экспоненциальным множителем $\exp(-h\nu / kT_e)$, и если это распределение измеряется в относительных единицах в некоторый фиксированный момент времени при заданных значениях n_e и T_e , то можно оценить температуру для данного момента времени.

На рис. 1а и 1б в качестве примера показана карта распределения интенсивности излучения лазерной плазмы, индуцированной абляцией серебряной мишени в воде, наблюдаемой с фильтрами 550 и 486 нм при различных задержках лазерного импульса.

Следует отметить, что полученные изображения имеют форму, характерную для лазерно-индуцированного плазменного факела с ярко выраженным плотным ядром и периферийными областями. Распределения интенсивности излучения плазмы вдоль оси разлета лазерного луча представлены на рис. 1в. Профили температуры, рассчитанные по уравнению для рекомбинационного излучения из [3] вдоль

направления лазерного импульса для двух фиксированных временных задержек относительно момента прихода к мишени лазерного воздействия представлены на рис. 1d.

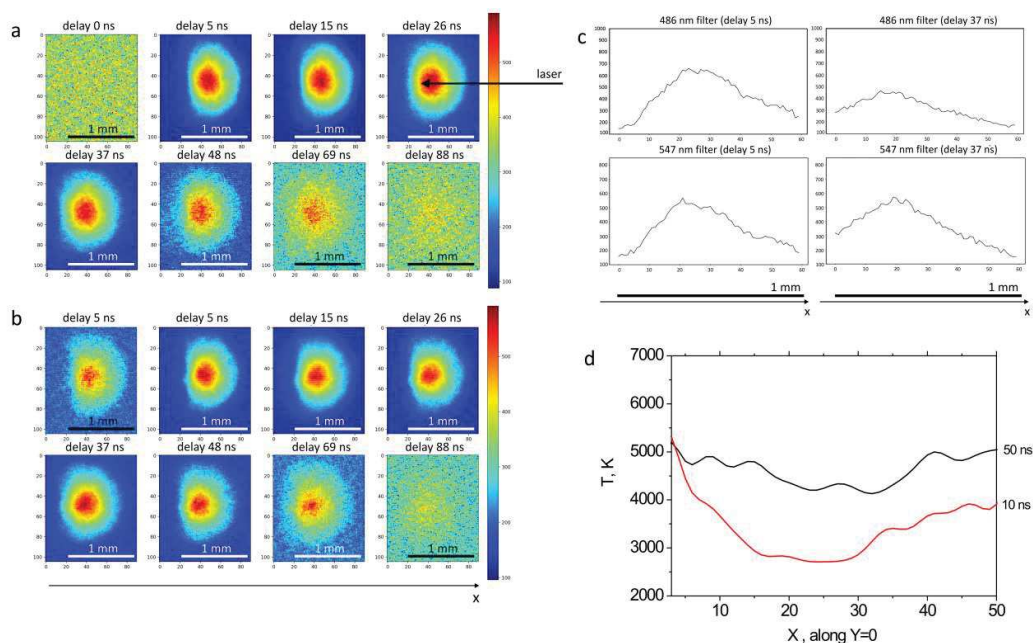


Рисунок 1 – Карта интенсивности излучения лазерной плазмы на длинах волн 486 нм (а) и 550 нм (б) с соответствующими аксиальными профилями (с); аксиальный профиль распределения температуры (d) вдоль направления лазерного луча для двух временных задержек (10 и 50 нс) относительно лазерного импульса. Ag мишень в воде, время задержки составляет 10 и 50 нс, ширина затвора 10 нс

По графику можно видеть, что в первые десятки наносекунд температура во внутренней (центральной) части плазмы ниже, а на фронте разлета выше более чем на 30 %. Эта особенность пространственного распределения интенсивности говорит о том, что там, где плотность выше (выше интенсивность), температура ниже, согласно уравнению состояния ($p = nkT$), при условии, что давление однородно по всему объему плазмы.

Экспериментально показано, что при лазерной абляции в воде в условиях наших экспериментов на начальном этапе формирования плазмы температура внутри лазерного факела ниже, чем во внешнем слое. Это можно объяснить экранирующим эффектом фронта плазмы, который всегда имеет место при абляции наносекундным лазером, а в случае жидкости эффект более выражен из-за более медленного расширения плазменного факела.

Таким образом, путем регистрации эмиссионных изображений плазмы на разных длинах волн (550 и 486 нм) были получены экспериментальные карты температуры лазерно-индуцированной плазмы в

воде, используемой для генерации металлических (Ag) наночастиц. Результаты обработки изображений показали изменение температуры в диапазоне 3000 и 6000 К по объему плазмы. Анализ пространственного распределения температуры и плотности вдоль оси разлета плазмы позволил выделить гипотетическую зону конденсации, в которой возможно образование НЧ. Экспериментальные результаты показывают важность исследований плазменной фазы для понимания механизмов зарождения и роста НЧ при лазерной абляции в жидких средах.

Работа выполнена при поддержке Национальной академии наук Беларуси (проект Конвергенция 2.2.05) и БРФФИ (грант Ф21УКРГ-009).

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang D., Gökce B., Barcikowski S. Chemical Reviews, 117–5 (2017) 3990–4103.
2. Dell'Aglio M., Gaudiuso R., De Pascale O., De Giacomo A. Applied Surface Science, 348 (2015) 4–9.
3. Зельдович, Я.Б. Физика ударных волн и низкотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966.

УДК 674.055:621.934(043.3)

Директор М.А. Андреев¹; доц. В.В. Чаевский²

¹ОХП «Институт сварки и защитных покрытий» НАН Беларуси, г. Минск;

²БГТУ, г. Минск)

СИНТЕЗ Hf – Zr – ZrN ПОКРЫТИЙ НА НОЖАХ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого материала инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. В быстрорежущих инструментальных сталях больше легирующих элементов, что увеличивает твердость, прочность и износостойкость инструмента. Тем не менее, возможен быстрый химический износ стального ножа инструмента из-за коррозии и механического износа, который объясняется присутствием экстрактивных веществ и кремнезема в древесине и древесных композитах [1]. В настоящее время достигнут существенный прогресс в улучшении ключевых характеристик инструментальных материалов путем нанесения модифицирующих покрытий с применением различных технологий их осаждения, среди которых наблюдаются две ос-