

Н.В. Тарасенко, канд. физ.-мат. наук, зав. центром  
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск);  
А.В. Буцень, ассист. (БГТУ, г. Минск)

## **ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ.**

Для решения задач лазерного спектрального анализа, а также для получения наноразмерных частиц методом лазерной абляции [1,2] применение двойных лазерных импульсов оказалось очень эффективным. В частности, было показано, что в двухимпульсном режиме скорость образования частиц выше, чем в режиме одноимпульсной абляции при том же количестве лазерных импульсов. Временной интервал между двойными импульсами определяется временем жизни газового пузыря и обычно лежит в диапазоне от 5 до 100 мкс.

**Экспериментальная установка.** Материал мишени аблировали и возбуждали двухимпульсным Nd:YAG-лазером с модуляцией добротности (модель LS 2131D, LOTIS ТП). Длительность и максимальная энергия каждого импульса составляли 10 нс и 100 МДж соответственно. Задержка между импульсами могла варьироваться от 0 до 120 мкс. Лазерное излучение фокусировалось кварцевым конденсором на мишень, расположенную в заполненной жидкостью кювете с кварцевыми окнами. Ортогональное поперечное сечение плазмы, образовавшейся вблизи поверхности мишени, проецировалось на щель спектрографа GMS-850 (фокусное расстояние 850 мм, решетка 600 линий/мм, щель 50 мкм). Образец цинкового сплава с известным составом (мас. %) в качестве мишени использовали Zn (83,4%), Cu (8,19%), Al (7,78%), Mg (0,76%), Fe (0,14%). Диагностика плазмы, генерируемой лазерным излучением на мишени, погруженной в жидкость, проводилась с использованием комбинации методов. Электронную концентрацию  $N_e$  определяли с использованием линии магния (Mg I 518,4 нм), которая расширена из-за квадратичного эффекта Штарка. Температуру оценивали по графику Больцмана для спектральных линий меди в диапазоне 510,5 - 529,2 нм, а также по отношению интенсивностей двух спектральных линий с низкой вероятностью реабсорбции (Zn I 307,2 и Zn I 307,6 нм). Экспериментально установленные значения концентрации электронов и температуры плазмы послужили основой для оценки концентрации компонентов материала мишени с использованием безэталонного метода LIBS.

**Определение параметров лазерной плазмы в воде.** Интегрированный по времени спектр плазмы, образующийся при воздействии

на мишень лазерного излучения в двухимпульсном режиме, зависит от длительности интервала  $\tau$  между ними. Когда мишень находилась под водой, эксперименты проводились со временем задержки  $\tau$ , равным 10, 25, 40, 50, 60, 75, 100, и 120 мкс. При первых двух указанных значениях  $\tau$  наблюдался очень интенсивный спектр непрерывного излучения, что затрудняло измерение интенсивности спектральных линий. По этой причине анализ спектров плазмы проводился с временными задержками между импульсами от 40 до 120 мкс

Количественными характеристиками свойств плазмы (в зависимости от  $\tau$ ) являются температура и концентрация электронов. Эти параметры были определены на основе анализа интенсивности и ширины спектральных линий, измеренных интегрально, без учета их изменений в процессе эволюции импульсного плазменного столба.

Параметры плазмы (температура и концентрация электронов), полученные с использованием вышеуказанных методов диагностики, приведены в таблице 1. Следует отметить, что значения температуры, определяемые группой медных линий с изменением  $\tau$ , практически не изменяются. Расхождения между значениями температуры, рассчитанными по линиям цинка Zn I 307,2 нм и Zn I 307,6 нм, несколько больше, что в определенной степени можно объяснить большей погрешностью измерения из-за сравнительно низкой интенсивности этих линий. Тем не менее, следует признать, что соответствие между значениями температуры, установленными атомными линиями двух различных элементов, является вполне удовлетворительным.

**Таблица 1 – Значения температуры и концентрации электронов в плазме при двухимпульсной абляции мишени в воде**

	$\lambda$ , нм	Временной сдвиг, мкс					
		40	50	60	75	100	120
$T_e$ , эВ	Группа линий меди (510,5 – 529,2 нм)	0,73	0,73	0,71	0,69	0,71	0,70
	Zn I 307,2 / Zn I 307,6	0,66	0,67	0,72	0,72	0,70	–
$N_e$ , $10^{17}$ см <sup>-3</sup>	$H_\alpha$ (FWHM)	6,7	5,8	4,4	3,6	2,6	2,5
	Mg I 518,4 (FWHM)	–	1,0	0,85	0,73	0,77	–

Стоит отметить, что значения концентрации электронов, определенные по ширине линии  $H_\alpha$ , значительно завышены из-за самопоглощения и могут служить лишь ориентиром. Следовательно, были приняты во внимание значения  $N_e$ , рассчитанные на основе ширины линии Mg I 518,4 нм.

**Оценка стехиометрического состава лазерно-индуцирован-**

**ной плазмы в воде.** Метод LIBS основан на известной зависимости интенсивности  $I$  спектральной линии

$$I = \frac{hc}{\lambda_0} A_{ij} g_i \frac{FC_z}{U_z} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $c$  - скорость света,  $\lambda_0$  - длина волны центра линии,  $A_{ij}$  - вероятность самопроизвольного перехода с верхнего уровня  $i$ ;  $g_i$  и  $E_i$  - статистический вес и энергия  $i$ -го уровня,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура плазмы;  $C_z$  - концентрация атомов  $z$  компоненты (химического элемента) в плазме,  $U$  - сумма по состояниям атомов  $z$  компонента,  $F$  - безразмерный коэффициент, учитывающий: объем плазмы, телесный угол сбора излучения, время регистрации излучения, потери света при регистрации и эффективность детектора системы регистрации.

Полученные значения интенсивностей спектральных линий атомов, а также температура, определяемая по группе линий меди в зеленой области спектра, и концентрация электронов, оцениваемая по линии магния, были использованы для проверки возможности сохранения стехиометрии материала, попадающего в плазму, которая возникает при воздействии лазерного излучения на мишень, погруженную в воду. Концентрацию ионного компонента (для элементов, ионные линии которых не регистрируются в плазме) рассчитывали с использованием уравнения Саха с учетом значения  $FC_z$ , т.е. концентрации  $N_z$  атомов  $z$ -компонента. Установленные значения  $FC_z$  атомов и ионов всех компонентов образца приведены к мас. значениям, и их сумма равна 1,0 (100%) [3].

Аналитические линии и полученные значения концентрации приведены в таблице 2 для четырех временных интервалов между двойными импульсами. Значения концентрации цинка, полученные по указанным линиям этого элемента, совпали с относительной погрешностью, не превышающей 3%; для остальных элементов относительная погрешность не превышает 8% и зависит от временной задержки между импульсами.

**Таблица 2 – Содержание (мас.%) элементов (Zn, Cu, Al) в лазерной плазме в воде при различных задержках между лазерными импульсами**

Элемент (содержание элемента, мас. %)	$\tau$ , мкс			
	50	60	75	100
Cu (8,19%)	7,9	8,9	9,8	12,5
Zn (83,4%)	85,1	84,1	83,3	82,2
Al (7,78%)	5,9	6,9	7,6	7,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением задержки между вторым и первым импульсами очевидна тенденция к увеличению концентрации легирующего элемента (меди, алюминия). Хотя по существу соотношения компонентов в образце и плазме не имеют резко выраженных различий, тем не менее, следует отметить, что фракционный характер легирующих добавок, поступающих в плазму, увеличивается с увеличением задержки. Такое проявление процессов фракционирования с увеличением задержки между двойными импульсами, скорее всего, объясняется переходом от взрывчатого к тепловому механизму поступления вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.S. Burakov, N.V. Tarasenko, A.V. Butsen, V.A. Rozantsev and M. . Nedel'ko // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2005. – V. 30. – P. 107–111.
2. V.S. Burakov (et al.) // *Spectrochimica Acta B*, – 2009. – № 64/2 – P. 141–146.
3. A. Ciucci [et al.]. *Appl. Spectroscopy*, – 1999. – № 53/8. – P 960–964.

УДК 577.3

П.П. Филиппова, преп.-стажер, (БГТУ, г. Минск);  
Д.В. Григорьева, доц., канд. биол. наук,  
И.В. Горудко, д-р биол. наук, проф.,  
(БГУ, г. Минск)

## ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ВАТЕРИТА С КАТАЛАЗОЙ В МОДЕЛЬНЫХ КЛЕТОЧНЫХ СИСТЕМАХ

В настоящее время отмечается интерес к использованию в качестве средств доставки неорганических носителей, в том числе карбонатов кальция, характеризующихся биоразлагаемостью, биосовместимостью, низкой токсичностью. Ватерит является одним из изоморфов карбоната кальция, характеризующийся идеальными механическими, физическими и химическими свойствами для включения лекарственных препаратов. Недостатком ватерита является небольшое включение и быстрое высвобождение положительно заряженных целевых молекул, низкая стабильность и перекристаллизация в более термодинамически устойчивый кальцит. Однако данные недостатки могут быть устранены дополнительным введением в ватерит различных биополимеров, в том числе природных полисахаридов с образованием