

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЖИДКОСТИ

А. Буцень, В.Бураков, В. Кирис, Н.Тарасенко.

Институт физики НАН Беларуси, пр. Независимости 68, 220072 Минск, Беларусь,
butsen@imaph.bas-net.by

В настоящей работе исследованы особенности эволюции компонентного состава лазерной плазмы, создаваемой в жидкости сдвоенными лазерными импульсами с использованием в качестве мишени образцов цинковых сплавов. Исследование было сконцентрировано на поступлении отдельных компонент материала мишени при вариации времени задержки между импульсами. При известных значениях температуры плазмы, концентрации электронов имелась возможность сравнения состава плазмы и материала мишени на основе метода LIBS в его бессертификационном варианте [1, 2]. Подобный подход к анализу компонентного состава плазмы, образуемой при воздействии лазерного излучения на мишень в жидкости, практически не имеет аналогов в литературе и важен для развития технологии получения наночастиц лазерно-плазменным методом.

Абляция и возбуждение материала мишени осуществлялись излучением лазера на алюмоиттриевом гранате (модель LS 2131D LOTIS ТП), работающего в двухимпульсном режиме (частота следования сдвоенных импульсов 10 Гц, каждый импульс длительностью 10 нс и энергией до 100 мДж). Задержка Δt между импульсами могла варьироваться до 100 мкс с шагом 1мкс. Излучение лазера после телескопа фокусировалось кварцевым конденсором на мишень, расположенную в кювете с кварцевыми окнами, заполненной дистиллированной водой. Изображение образуемой у мишени плазмы проецировалось на щель спектрографа GMS-850 (оптическая схема Черни-Тернера, фокусное расстояние 850 мм, решетка 600 штр./мм, щель 30 мкм). Диагностика плазмы проводилась с использованием совокупности спектроскопических методов. Концентрация электронов N_e определялась из уширения линий H_β водорода и магния $MgI\ 517,2\text{нм}$, испытывающих уширение вследствие соответственно линейного и квадратичного эффекта Штарка. Температура плазмы оценивалась из построения Больцмана, использовались спектральные линии меди в области 510,5 – 529,2 нм, а также по отношению интенсивностей двух спектральных линий с малой вероятностью реабсорбции ($ZnI\ 307,2/ZnI\ 307,6\text{нм}$). Концентрации компонент материала мишени в плазме оценивалась с помощью метода LIBS.

На рис. 1 приведен фрагмент спектра излучения плазмы в ультрафиолетовом диапазоне, полученный при воздействии лазерного излучения на мишень, имеющую следующий компонентный состав: цинк – 83,4%, алюминий – 7,78, медь – 8,19, магний – 0,76, железо – 0,14%. Спектры на рис.1 представлены для четырех значений временного интервала между воздействующими лазерными импульсами.

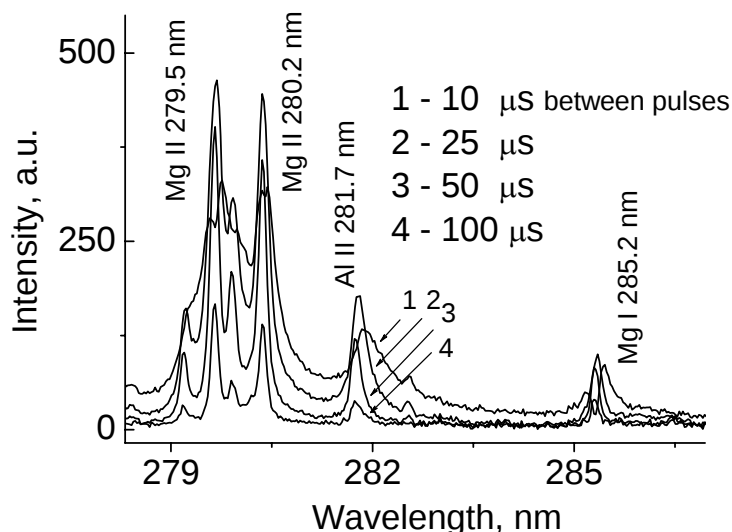


Рис. 1. Фрагмент спектра излучения лазерной плазмы мишени из цинкового сплава, погруженной в воду.

Из рис. 1 видно, что с увеличением Дф интенсивность спектральных линий резко уменьшается. Эксперименты проводились последовательно при Дф, равных 10 мкс, 25, 40, 50, 60, 75, 100 и 120 мкс. При двух первых значениях Дф весьма интенсивен спектр непрерывного излучения, что затрудняло проведение измерений интенсивности спектральных линий. Поэтому последующий анализ проводился при временных задержках второго импульса от 40 до 120 мкс.

Для выбранных значений Дф величины интенсивности ряда спектральных линий нейтральных и однократно ионизованных атомов были аппроксимированы функцией Фойгта. Для наглядности на рис. 2 изображены зависимости интенсивности ряда спектральных линий от временной задержки между импульсами. В рассматриваемом временном диапазоне задержек линии, принадлежащие атомарным компонентам, релаксируют быстрее по сравнению с линиями ионов. Для некоторых спектральных линий интенсивности малы, однако они иногда достаточно информативны, так как не подвержены самопоглощению.

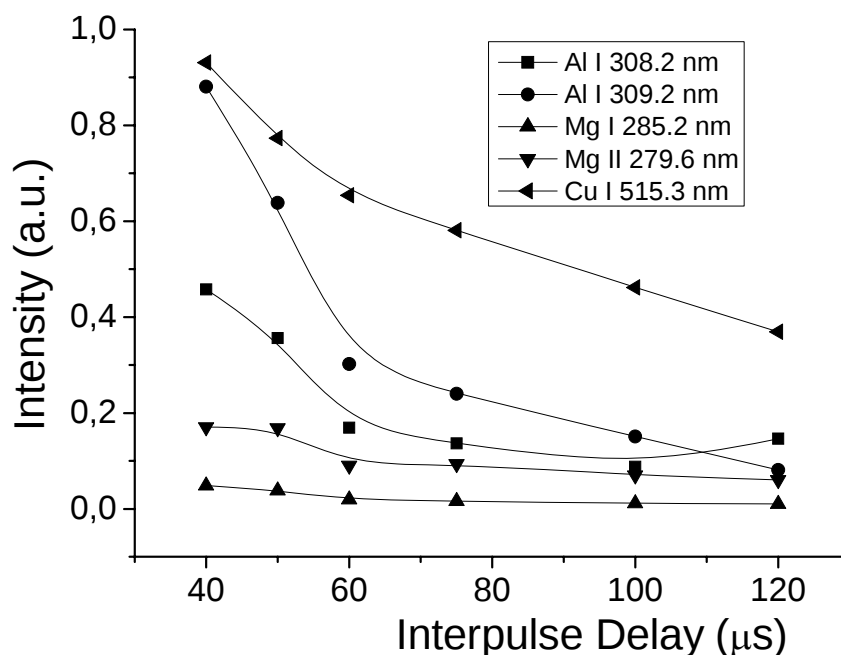


Рис.2 – Зависимости интегральной интенсивности спектральных линий от величины временного сдвига между лазерными импульсами

Используя значения интенсивностей спектральных линий атомов, значения температуры, определенной по группе линий меди в зеленой области спектра, и оцененной по уширению линии магния концентрации электронов, проверена возможность стехиометрического поступления материала мишени в лазерную плазму в жидкости. С этой целью была опробована возможность применения метода LIBS в безэталонном варианте [1,2].

Метод LIBS базируется на известной зависимости интенсивности спектральной линии

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

Здесь h – постоянная Планка, c – скорость света, λ_0 – длина волны центра линии, A_{ij} – вероятность спонтанного 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 для атомов z компоненты, F – безразмерный коэффициент, учитывающий: объем плазмы, телесный угол сбора излучения, время регистрации плазмы, эффективность самой системы регистрации. Расчет концентрации ионной составляющей (для элементов,

ионные линии которых в плазме не регистрируются) производился при помощи уравнения Саха с учетом значения FC_z , т.е. концентрации N_z атомов z-компоненты. Установленные значения FC_z атомов и ионов всех составляющих пробы приводились к массовым значениям и их сумма приравнивалась к 1.0 (100%). Если концентрация отдельных компонент не поддается определению, вследствие отсутствия их спектральных линий при выбранных условиях получения спектра, то следует вычесть их долю из приведенной суммы (если эта доля ориентировочно известна).

При определении содержания меди и цинка использовались линии в видимом участке спектра. В регистрируемом участке отсутствовали линии алюминия; этот элемент определялся по спектру в области ультрафиолета. Аналитические линии и полученные значения концентраций приведены в таблице 1.

Как видно из представленных в таблице данных, при возрастании задержки между вторым и первым импульсами проявляется тенденция увеличения концентрации легирующего элемента (медь, алюминий), хотя в сущности соотношения компонент в образце и плазме не имеют резко выраженных различий. Расхождения сопоставляемых значений концентраций можно отнести к погрешности измерений. Правильнее говорить о фактическом отсутствии фракционного поступления в плазму материала мишени при воздействии на нее лазерного излучения.

Таблица 1 – Содержание (%) элементов (Zn, Cu, Al) в лазерной плазме цинкового сплава, определенных методом LIBS при различных сдвигах между лазерными импульсами

Аналитическая линия (нм)	Дф =50 мкс	60 мкс	75 мкс	100 мкс
Cu I 521.8	7.9	8,9	9.8	12.5
Zn I 481.0	84.1	83,1	82.2	79.5
Al I 308.2	5.9	6.9	7.6	7.2
Al I 309.2	5.9	6.8	7.5	6.9
Zn I 328.2	86.1	85.1	84.4	84.9

Литература

1. Ciucci A., Corsi M., Palleschi V., Rastelli S., Salvetti A., and Tognoni E., Appl. Spectroscopy, **53**, (1999) 960-964.
2. Palleschi V, Tognoni E., Ciucci A, Rastelli S., Patent No.: US 6,657,721 B1, Dec.2, 2003.