

## ЛИТЕРАТУРА

1. Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co)-покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний / О.Г Бобрович [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2006, №1. С. 54–58.

2. Бобрович О.Г., Тульев В.В. Анализ композиционного состава и химических связей элементов металлосодержащих (Zr,W) покрытий // Физика. Известия высших учебных заведений. 2011, № 1/3. С. 350–354.

3. Тульев В.В., Ташлыков И.С. Изучение композиционного состава покрытий на основе Cr, Ti и Zr, сформированных на алюминии и кремнии методом ионно-ассистированного нанесения в условиях саморадиации // Труды IV Междунар. науч. конф. «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». Томск, 2004. С. 92–95.

УДК 543.423

Н.В. Тарасенко; А.В. Буцень<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Институт физики НАН Беларуси); <sup>2</sup>(БГТУ, г. Минск)

## ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В ЖИДКОСТИ

В последнее время большое внимание уделяется разработке методов синтеза и исследованию свойств наноразмерных частиц (НЧ) различных материалов. Интерес к таким объектам обусловлен их специфическими свойствами, привлекательными для многих практических применений.

Среди новых методов получения НЧ важное место принадлежит методу, основанному на импульсной лазерной абляции в жидкости

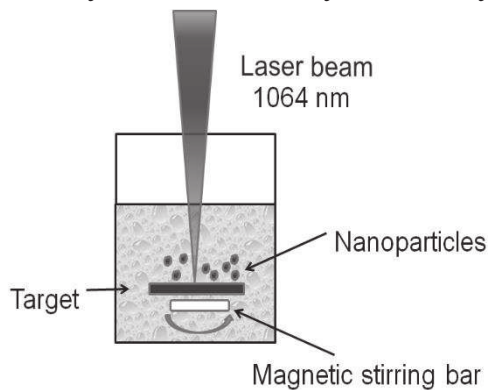


Рисунок 1 – Схема лазерной абляции в жидкости

(ИЛАЖ) [1], схема которого приведена на рис. 1. Наночастицы, образующиеся в результате лазерной абляции в жидкостях, свободны как от посторонних ионов, так и от поверхностно-активных веществ, что для ряда применений, например, в медицине, представляет несомненное преимущество. К достоинствам метода лазерной абляции относится также его универсальность (лазерная

абляция может применяться для металлов, полупроводников и диэлектриков различного состава), возможность регулирования характеристик синтезируемых частиц путем изменения параметров лазерного излучения, а также сравнительно легкое решение вопроса сбора наночастиц, проблематичного в случае лазерной абляции в вакууме. При абляции в жидкости наночастицы остаются в объеме жидкости, образуя коллоидный раствор.

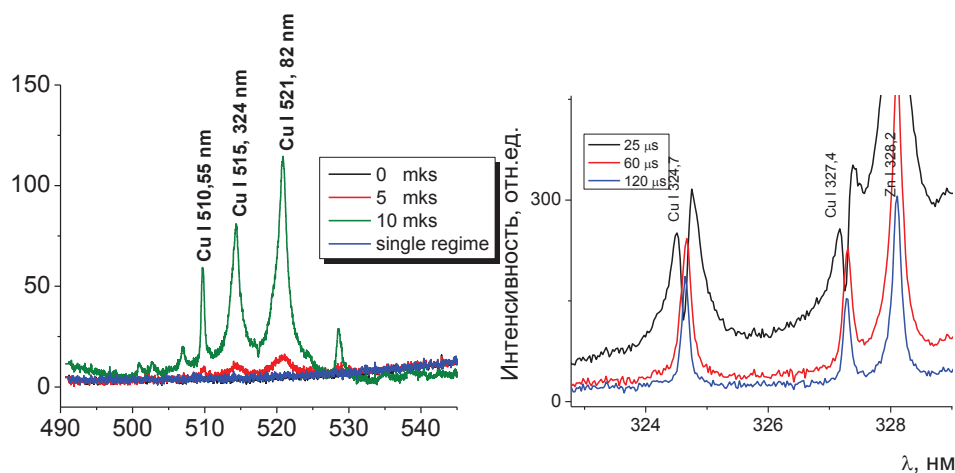
В настоящей статье обобщены результаты исследований автора, направленные на формирование наночастиц контролируемого состава, структуры и размеров в лазерно-индуцированной плазме в жидкофазных средах, установление корреляций компонентного состава лазерно-эрозионной плазмы, параметров воздействующего лазерного излучения и свойств генерируемых структур, а также применение лазерного излучения для оптимизации условий роста и характеристик формируемых структур.

В качестве источника излучения использовался двухимпульсный ИАГ: $\text{Nd}^{3+}$  лазер (LOTIS, LS2131D) с длительностью импульса 10 нс, частотой повторения импульсов 10 Гц, работающий на частоте основной гармоники (1064 нм). Временной сдвиг между лазерными импульсами (задержка) варьировался в диапазоне 0–120 мкс с минимальным шагом 1 мкс. Лазерное излучение фокусировалось на поверхность мишени, помещаемой в кювету с жидкостью. Плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени изменялась в пределах от  $10^8$  до  $5 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>. Методами регистрации изображений и эмиссионной спектроскопии выполнены экспериментальные исследования пространственно-временной структуры плазмы, формируемой при лазерной абляции в жидкости при использовании сдвоенных лазерных импульсов. На основе результатов спектроскопической диагностики определены параметры плазмы (температура и концентрация электронов, концентрация нейтральных атомов и радикалов) в зависимости от экспериментальных условий создания плазмы.

Основные особенности формирования пространственной структуры и временной эволюции лазерной плазмы, образуемой при использовании сдвоенных лазерных импульсов, связаны с тем, что второй лазерный импульс воздействует на мишень в присутствии продуктов лазерной абляции от первого импульса. В связи с этим наблюдается изменение, как динамики разлета, так и интенсивности излучения плазмы.

Несмотря на сложную пространственно-временную структуру, высокую плотность и неоднородность лазерно-индуцированной плазмы, спектроскопическая диагностика такой плазмы представляется

весьма информативной. На рисунке 2 представлены фрагменты интегрального по времени спектра лазерного факела, полученного при одно- и двухимпульсной абляции медной мишени в воде при различных временных задержках между лазерными импульсами. В спектре плазмы после одиночного импульса преобладает сплошное излучение. Сплошной спектр испускания определяется такими процессами, как фотоионизация, радиационная рекомбинация и обратный тормозной процесс. Следует отметить, что, как показали разрешенные во времени измерения, эмиссионный сигнал исчезал в течение нескольких сотен наносекунд вследствие быстрого охлаждения плазмы. Интенсивный сплошной спектр доминирует также в эмиссионном спектре, полученном при двухимпульсной абляции при коротких задержках окна регистрации. С увеличением времени задержки в двухимпульсном режиме абляции начинают появляться отдельные спектральные линии атомов материала мишени. Представленные на рисунке 2 спектры и отражают временную эволюцию лазерно индуцированной плазмы. Увеличение временной задержки между импульсами позволяет по характеру изменения спектра излучения плазмы установить временные рамки эволюции газового пузыря в жидкости. В нашем эксперименте наиболее интенсивный спектр регистрировался при задержках между импульсами, превышающих 150 мкс, так что время расширения газового пузыря составляет сотни микросекунд. Эти результаты находятся в соответствии с результатами измерений других авторов.



**Рисунок 2 – Фрагменты интегрального по времени спектра лазерной плазмы медной мишени, полученного при одно- (1) и двухимпульсной абляции медной мишени в воде при различных временных задержках между лазерными импульсами**

Четкие эмиссионные линии атомов меди по сравнению с одноимпульсным режимом обусловлены тем, что второй импульс индуцирует плазму внутри газового пузыря, образованного в результате

распада плазмы первого импульса. После первого импульса плазма расширяется и рекомбинирует, ее электронная плотность уменьшается со временем. Второй лазерный импульс проходит через относительно разреженную среду и поэтому эффективнее взаимодействует с поверхностью. Это приводит к увеличению сигнала вследствие как увеличения количества испаренного материала мишени, так и более однородного распределения плотности и температуры в результирующей плазме.

Таким образом, в результате выполненных исследований продемонстрировано, что метод лазерной абляции в жидкости обеспечивает получение наноразмерных частиц металлов и их химических соединений, морфология и состав которых зависят как от сорта растворителя, так и параметров лазерного излучения.

На основе спектроскопической диагностики плазмы, создаваемой при воздействии лазерных импульсов на поверхность металлической мишени в жидкости, выяснена пространственная структура и временной диапазон излучения лазерно-индуцированной плазмы, определен ее компонентный состав, необходимый для оптимизации процесса синтеза наночастиц, так как параметры лазерно-индуцированной плазмы определяют характер протекания процессов зарождения и роста наночастиц при ее распаде.

Показано, что использование двухимпульсного режима позволяет повысить скорость формирования наночастиц и усилить эмиссионный сигнал атомов и ионов плазмы за счет более эффективной абляции материала мишени.

Установлены особенности пространственно-временной эволюции лазерной плазмы, формируемой при использовании одиночных и сдвоенных лазерных импульсов, заключающиеся в изменении, как динамики разлета, так и интенсивности испускания плазмы по сравнению с одноимпульсным режимом. Показано, что размеры и время жизни плазмы в жидкости в несколько раз меньше по сравнению с аналогичными параметрами плазмы в воздухе, что связано с ограничением возможности расширения плазменного факела со стороны окружающей жидкости, оказывающей существенное влияние на термодинамические и кинетические характеристики факела и протекание процессов конденсации в нем. Понимание закономерностей эволюции лазерной плазмы позволяет сделать оптимизацию условий лазерного синтеза наночастиц более эффективной.

Таким образом, на основе спектроскопической диагностики плазмы, создаваемой при воздействии лазерных импульсов на поверхность металлической мишени в жидкости, выяснена пространственная структура и временной диапазон излучения лазерно-индуцированной плазмы, определен ее компонентный состав, необходимый для опти-

мизации процесса синтеза наночастиц, так как параметры лазерно-индуцированной плазмы определяют характер протекания процессов зарождения и роста наночастиц при ее распаде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасенко Н.В., Буцень А. В. Лазерный синтез и модификация композитных наночастиц в жидкостях // Квантовая электроника. Т. 40, № 11 (2010). С. 986–1003.

УДК 621.793:539.234:539.534.9

В.В. Поплавский<sup>1</sup>, доц., канд. физ.-мат. наук;  
А.Н. Дробов<sup>2</sup>, науч. сотр.; И.Л. Поболь<sup>2</sup>, доц., д-р. техн. наук;  
И.П. Смягликов<sup>2</sup>, канд. техн. наук;  
С.В. Гусакова<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук  
<sup>1</sup>(БГТУ, г. Минск), <sup>2</sup>(ФТИ НАН Беларуси, г. Минск); <sup>3</sup>(БГУ, г. Минск)

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА СЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ В ПРОЦЕССАХ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ СПЛАВА ТИТАНА**

Сплавы титана обладают уникальными свойствами, благодаря сочетанию низкой плотности, высокой прочности и жесткости, ударной вязкости и коррозионной стойкости. Вместе с тем низкая поверхностная твердость и недостаточная износостойкость титана и его сплавов ограничивает использование материалов в узлах и деталях, функционирующих в условиях контактного взаимодействия, что требует модифицирования поверхности с целью улучшения ее механических свойств [1].

Вследствие образования на поверхности металла и его сплавов оксидной пленки в атмосферных условиях, а также пассивации в растворах электролитов без приложения потенциала титан обладает высокой коррозионной стойкостью. Этим обусловлено применение титана в качестве электродного материала в прикладной электрохимии, чаще всего в качестве основы так называемых малоизнашиваемых анодов [2]. Титановые сплавы применяются также для изготовления токовых коллекторов (биполярных пластин) топливных элементов и электролизеров получения водорода с полимерным мембранным электролитом [3]. При использовании в качестве электролита перфторированной мембраны типа Nafion, материал которой представляет собой фторуглеродный полимер, содержащий сульфогруппы [4], в условиях работы топливного элемента рабочие поверхности токовых коллекторов, контактирующие с мембранно-электродным блоком, подвержены электрохимической коррозии вследствие достаточно высокой агрес-