

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

диссертационного совета Д 003.053.01 при ИТ СО РАН о диссертационной работе Старинского Сергей Викторовича «Импульсная лазерная абляция серебра, золота и их сплавов в различных средах в режимах синтеза наноструктур», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

1. Диссертационная работа выполнена в Лаборатории физических процессов энергетики ИТ СО РАН (лаб. 10.1).

2. Диссертационная работа посвящена экспериментальному и численному исследованию наносекундной импульсной лазерной абляции серебра, золота и их сплавов с целью установления основных закономерностей лазерного синтеза наноструктур указанных металлов в различных средах (в вакууме, фоновом газе и в жидкости).

В процессе выполнения были поставлены и решены следующие задачи:

- Определение механизмов уноса вещества при лазерной абляции благородных металлов и их сплавов в различных средах;
- Установление состава и динамики разлета продуктов абляции при различных режимах лазерного облучения;
- Лазерный синтез наноструктурных пленок благородных металлов в вакууме и фоновом газе, выявление корреляций между условиями синтеза, параметрами осаждаемых частиц и свойствами пленок;
- Лазерный синтез коллоидных растворов наночастиц благородных металлов и определение влияния условий облучения на их свойства;
- Анализ механизмов формирования наноструктур в различных средах, а также определение условий лазерного синтеза наноматериалов с заданными характеристиками.

3. Основные результаты работы Старинского С.В.:

- Проведено многопараметрическое экспериментальное исследование и численное моделирование на базе тепловой модели наносекундной лазерной абляции серебра, золота и их сплавов лазерными импульсами низкой и умеренной интенсивности (диапазон плотностей энергии излучения  $0,1-20 \text{ Дж/см}^2$ ) в трех различных средах — вакууме, фоновом газе и жидкости. Показано, что в вакууме и в фоновом газе доминирующим механизмом абляции является нормальное тепловое испарение атомов металлов. В жидкой среде основным механизмом уноса вещества является разбрызгивание расплава мишени под действием пара жидкости.
- Определены минимальные значения плотности энергии излучения для лазерной модификации поверхности (пороги модификации) золота, серебра и их сплавов в воздухе

и воде. Найдено, что пороги модификации сплавов значительно ниже, чем пороги чистых металлов, что объясняется более низкой теплопроводностью сплавов. Установлено, что пороги модификации в воде всех металлов систематически, примерно в 1,5 раза, выше соответствующих значений в воздухе, что не может быть объяснено кондуктивным теплообменом металла с окружающей средой. Высказана и обоснована гипотеза о том, что более высокие пороги модификации обусловлены перегревом и вскипанием воды, приводящим к рассеянию лазерного излучения.

– Найдено, что кинетическая энергия атомов в продуктах абляции металлов в вакууме значительно превышает их тепловую энергию при испарении даже для низких интенсивностей излучения, когда ионизация испаренного вещества пренебрежимо мала. Показано, что такие режимы абляции могут использоваться для синтеза наноструктурных пленок путем осаждения продуктов абляции на подложку, а формирование наноструктур происходит в результате диффузии осажденных атомов, имеющих высокую подвижность на поверхности, с последующей нуклеацией. При абляции золота в вакууме импульсами низкой интенсивности с поверхности мишени эмитируются димеры, которые могут служить центрами нуклеации.

– Установлено, что при абляции золота и серебра в фоновом газе при давлении более ~ 100 Па в продуктах абляции в результате конденсации эффективно образуются малые кластеры  $Au_n$  и  $Ag_n$  ( $n = 2 - 10$ ), которые при осаждении на подложку являются зародышами наноструктур. Показано, что размером наноструктур на поверхности можно эффективно управлять, варьируя давление фонового газа и температуру подложки. Найдено, что при абляции золота и серебра в кислородсодержащем газе образуются оксидные кластеры, основными из которых являются монооксиды  $Ag_nO$  и  $Au_nO$ . Методом лазерной абляции в кислороде получены наноструктурные пленки оксида серебра.

– Показано, что на ранних стадиях лазерного нагрева металлов в жидкости вблизи мишени формируется сплошная паровая пленка, и абляция происходит как в фоновом газе высокого давления. Синтезированы коллоидные растворы золота и серебра при абляции в воде с бимодальным распределением наночастиц по размерам. Предложен метод определения размеров и концентраций отдельных популяций наночастиц на основе анализа спектров экстинкции коллоидных растворов.

– Найдено, что при лазерной абляции сплава золото-серебро в фоновом газе формируются смешанные кластеры различной стехиометрии, а при абляции в жидкости — наночастицы преимущественно стехиометрического состава. Продемонстрирована возможность управления положением пика плазмонного резонанса наночастиц путем изменения состава сплава, облучаемого в жидкости. Получено экспериментальное

доказательство того, что при лазерной абляции в жидкости наночастицы образуются в результате эмиссии с поверхности расплавленной мишени.

4. Рассмотрев содержание диссертации и автореферата, комиссия пришла к выводу, что тема диссертации, а также ее содержание соответствует научной специальности 01.04.14 – «теплофизика и теоретическая теплотехника» по физико-математическим наукам.

По теме диссертации опубликовано 9 статей, в том числе 6 статей – в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК. Основные результаты работы представлялись на 9 всероссийских и 12 международных конференциях и симпозиумах. Комиссия считает, что представленные соискателем ученой степени материалы диссертации в полной мере опубликованы в научных рецензируемых изданиях. Требования к публикациям, предусмотренные пунктами 11, 13 «Положения о присуждении ученых степеней» соблюдены.

Постановка задач исследований осуществлена соискателем совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. А.В. Булгаковым. Автор принимал участие в разработке новых и модификации имеющихся экспериментальных стендов. Все экспериментальные результаты, включенные в данную работу, получены при непосредственном участии автора работы в составе научной группы. Расчеты и моделирование проведено автором лично. Материалы других авторов, использованные в диссертации Старинского С.В., во всех случаях содержат ссылку на источник и удовлетворяют требованиям пункта 14 «Положения о присуждении ученых степеней».

Экспертная комиссия рекомендует принять к защите диссертационную работу Старинского С.В. «Импульсная лазерная абляция серебра, золота и их сплавов в различных средах в режимах синтеза наноструктур» по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, по физико-математическим наукам в диссертационном совете Д 003.053.01 при ИТ СО РАН.

Председатель комиссии:

Д.ф.-м.н.

Новопашин С.А.

Члены комиссии:

Д.ф.-м.н., профессор



Чекмарев С.Ф.

Академик РАН, профессор



Ребров А.К.