

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук

Ашиткова Сергея Игоревича

на диссертацию Данилова Павла Александровича

«Прецизионное лазерное микро- и наноструктурирование серебряных пленок»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.21 - Лазерная физика

Задача формирования микро- и нанорельефа с выраженными плазмонными свойствами методом лазерной абляции в воздухе связана с процессами вложения и последующего транспорта энергии лазерных импульсов, модификации поверхностного слоя и удаления вещества. Большинство экспериментальных и теоретических работ в данной области направлено в основном на исследование удаления материала или модификацию поверхности мишени. Тем не менее, изучение процессов вложения и транспорта энергии лазерных импульсов, определяющих механизмы абляционного удаления материала, всю последующую динамику и потери, требует новых подходов, в том числе и в экспериментальном уточнении значений фундаментальных констант, используемых в теоретических моделях. Все это в совокупности является актуальным с точки зрения вклада в моделирование неравновесных состояний и создания целостной картины физических механизмов формирования микро- и наноструктур в металлических пленках под действием лазерных импульсов ультракороткой длительности (УКИ).

Диссертация Данилова Павла Александровича посвящена экспериментальному исследованию формирования лазерно-индуцированных микро- и наноструктур на поверхности серебряных нанопленок различной толщины. В работе используются лазерные импульсы фемтосекундной длительности видимого и ближнего ИК-диапазонов спектра. На основе анализа пропускания и поглощения УКИ при взаимодействии с серебряными пленками исследованы процессы вложения энергии и электронной динамики, экспериментально определена константа электрон-электронного рассеяния в серебре. Обнаружены нелокальные абляционные эффекты, связанные с латеральной теплопроводностью в пленке, которая оказывает существенное влияние на конечную морфологию структур. Также проведена количественная оценка пространственного перемещения материала – определены массовые доли удаленного и перераспределенного расплава при формировании нанопичков на серебряной пленке толщиной 100 нм.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 107 страниц печатного текста, 34 рисунка и 2 таблицы. Библиография включает 129 наименований.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, определяются основные цели и задачи работы, приводятся методы исследований, научная новизна, а также сформулированы защищаемые положения и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен литературный обзор имеющихся статей по тематике лазерно-индуцированного формирования микро- и наноструктур на тонких пленках и металлах. Рассмотрены преимущества и недостатки метода, приведены теоретические модели, описывающие электронную динамику при взаимодействии УКИ с металлами. Рассмотрены основные применения микро- и наноструктур в широком спектре приложений.

Во второй главе приводится описание используемых экспериментальных установок, методик исследований и обработки результатов.

В третьей главе приведены основные экспериментальные результаты работы. Обнаружено увеличение пропускания и усиление поглощения лазерных УКИ при взаимодействии с серебряными пленками различной толщины для длин волн ближнего ИК и видимого диапазонов (1030 нм и 515 нм соответственно). Анализ полученных данных позволил определить величину константы электрон-электронного взаимодействия для серебра в случае сильно нагретого электронного газа, а также сделать вывод о вкладе носителей из d -зоны в поглощение по мере роста интенсивности УКИ. Измерены пороги абляции серебряных пленок различной толщины при варьируемых параметрах фокусировки. Корреляция полученных результатов с размерами отверстий позволила сделать вывод о наличии латерального теплопереноса в пленке. Также в работе на основе энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) предложен и успешно применен оригинальный метод количественного профилометрического анализа пространственного перемещения расплавленного материала в процессе формирования микро- и нанопичков на поверхности серебряной пленки под действием одиночных УКИ видимого диапазона. С его помощью установлены доли перемещенного и удаленного в виде нанок капель расплава из области фокального пятна.

В четвертой главе приведены практические применения лазерной абляции для формирования как отдельных микроэлементов сложной формы, так и функциональных массивов микроотверстий на поверхности тонких металлических пленок за счет использования дифракционно-оптических элементов (ДОЭ). Исследование абляционных отпечатков секторных зеркал на поверхности серебряной пленки позволяет сделать вывод об увеличении глубины фокусировки при микрообработке за счет интерференции источников тепловых волн, которым соответствуют горячие точки распределения интенсивности УКИ, прошедших через ДОЭ. Также в работе реализована высокая скорость (25 млн. элементов в секунду) записи массива микроотверстий диаметром в единицы микрометров. Такая производительность получена благодаря мультиплексированию ($N = 51$ элемент) лазерного пучка за счет применения специального ДОЭ, высокой скорости позиционирования (7 м/с) и частоты следования импульсов (500 кГц) лазерной системы.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

Защищаемые положения являются обоснованными. Основные результаты исследований имеют высокую степень новизны. Было впервые обнаружено увеличение коэффициента пропускания ультракоротких лазерных импульсов в ближнем ИК-диапазоне спектра с ростом интенсивности излучения и определено значение константы электрон-электронного взаимодействия для металла с сильным межзонным поглощением в случае сильно нагретого электронного газа. Результаты работы являются достоверными, были представлены на ряде международных конференций и семинарах ОКРФ ФИАН. По результатам диссертации опубликовано 7 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и SCOPUS.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Представляется недостаточно подробным описание соискателем экспериментальной части. В частности отсутствуют калибровочные кривые используемых фотодетекторов на предмет анализа линейности их свет-сигнальных характеристик в рассматриваемом диапазоне измерений. Также было бы полезно более подробно описать методику измерений коэффициентов отражения/пропускания пленок (рисунок 2.2), включая фокусировку на мишень, калибровку нейтральных светофильтров, описание методики измерения плотности энергии лазерного излучения в фокальном пятне.
2. В разделе 3.1 на рисунке 3.3 приведено начальное значение коэффициента экстинкции пленки серебра на длине волны 1030 нм, рассчитанное по литературным данным оптических констант. Однако, в связи с большим разбросом табличных данных, было бы более реалистичным непосредственное измерение коэффициента поглощения для исследуемого образца, как это было сделано в разделе 3.2 для длины волны 515 нм.
3. В главе 3 в системе уравнений энергетического баланса для электронной и ионной подсистем (3.4)-(3.5) не приведены выражения (или значения) электронной и ионной теплоемкости, теплопроводности и коэффициента электрон-фононного теплообмена для серебра, используемые при расчетах. Кроме того, не ясно, учитывалась ли зависимость этих параметров от температуры?
4. В разделе 3.1 при рассмотрении пропускания пленки на длине волны 1030 нм не дано выражение для определения коэффициента экстинкции. Подобное выражение (формула (3.9)) дано только в следующем разделе 3.2 для длины волны 515 нм. Во-первых: это усложняет восприятие материала, во-вторых: неясно, такое же выражение было использовано в разделе 3.1, или другое.
5. В тексте диссертации имеет место неточность формулировок. Например, частота электрон-электронных столкновений была не "измерена" (стр. 54), а определена в результате измерения коэффициента экстинкции. Также имеется ряд опечаток в виде пропущенных слов, предлогов и др. (стр.9, 28, 35, 39).

Отмеченные недостатки не снижают научной значимости результатов, представленных в диссертации, и не снижают ее общей положительной оценки.

Диссертационная работа подтверждает научную квалификацию Данилова П.А. Автореферат достоверно отражает содержание диссертации. Считаю, что диссертация Данилова П.А. «Прецизионное лазерное микро- и наноструктурирование серебряных пленок» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Данилов Павел Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 — Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Старший научный сотрудник лаборатории лазерного воздействия Отдела физики экстремальных состояний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур РАН, кандидат физико-математических наук

Ашитков Сергей Игоревич

« 31 » мая 2021 г.

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2

Телефон: +7 (495) 485-83-45

e-mail: ashitkov11@yandex.ru

Подпись старшего научного сотрудника ФГБУН ОИВТ РАН, кандидата физико-математических наук Ашиткова Сергея Игоревича заверяю

Ученый секретарь

ФГБУН ОИВТ РАН

д. ф.-м. н.



Р.Х. Амиров

Список основных публикаций С.И. Ашиткова по теме защищаемой диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет:

1. M. B. Agranat, O. V. Chefonov, A. V. Ovchinnikov, S. I. Ashitkov, and V. E. Fortov. Damage in a Thin Metal Film by High-Power Terahertz Radiation // Phys. Rev. Lett. 120, 085704 (2018)
2. Е. В. Струлева, П. С. Комаров, С. И. Ашитков. Сравнение фемтосекундной лазерной абляции золота и никеля // ТВТ 57(5) 659 (2019)
3. S. A. Romashevskiy, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat. Femtosecond Laser Technology for SolidState Material Processing: Creation of Functional Surfaces and Selective Modification of Nanoscale Layers // High. Temp. 56(4) 587 (2018)
4. S. A. Romashevskiy, P. A. Tsygankov, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat. Layer-by-Layer Modification of Thin Film Metal-Semiconductor Multilayers with Ultrashort Laser Pulses // Appl. Phys. A, 124, 1, (2018)
5. A. A. Yurkevich, S. I. Ashitkov, and M. B. Agranat. Permittivity of gold with a strongly excited electronic subsystem Phys. Plasmas 24, 113106 (2017)
6. Г. И. Канель, Е. Б. Зарецкий, С. В. Разоренов, С. И. Ашитков, В. Е. Фортов. Необычные пластичность и прочность металлов при ультракоротких длительностях нагрузки // УФН 187(5), 525 (2017)
7. S. A. Romashevskiy, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat. Circular ripple patterns on silicon induced by bubble-diffracted femtosecond laser pulses in liquid // Opt. Lett. 45(4), 1005 (2020)
8. С. А. Ромашевский, В. А. Хохлов, С. И. Ашитков, В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов, П. С. Комаров, А. Н. Паршиков, Ю. В. Петров, Е. В. Струлева, П. А. Цыганков. Фемтосекундное лазерное воздействие на многослойную наноструктуру металл-металл // ПЖЭТФ, 113(5) 311 (2021).