

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук

Голованя Леонида Анатольевича

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

Диссертационная работа П. А. Данилова посвящена изучению формирования микро- и наноструктур на поверхности серебряных пленок под действием остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов фемтосекундной длительности. Варьируя параметры лазерного излучения и фокусировки, применяя различные оптические элементы, можно получать элементы заданной формы и размеров, обладающие уникальными оптическими свойствами, что находит применение в приложениях наноплазмоники, сенсорики и биомедицины. В последние десятилетия исследования по данной теме активно развиваются во всем мире. Однако процессы взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) с металлами и металлическими пленками имеют сложную многостадийную динамику, что в свою очередь вызывает сложности с систематическим изучением всех стадий, начиная с вложения энергии лазерного излучения и нагрева электронной подсистемы, последующего транспорта энергии в решетку, и заканчивая удалением расплавленного материала из области взаимодействия. Теоретическое моделирование первых двух стадий (вложение и транспорт) требует уточнения значений фундаментальных констант и граничных условий, особенно в неравновесном состоянии системы. Поэтому использование новых подходов в экспериментальных исследованиях электронной динамики неравновесных состояний позволяет улучшить уровень теоретических моделей и вносит значительный вклад в целостность картины лазерного абляционного формирования микро- и наноструктур на поверхности металлических пленок, обеспечивая актуальность диссертационной работы.

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

Во введении сформулированы: актуальность работы, цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту. Также представлены достоверность полученных результатов, информация о личном вкладе автора, публикации по теме диссертации и апробация результатов.

Первая глава представляет собой достаточно лаконичный, но, тем не менее, содержащий необходимую для читателя информацию обзор литературы. В ней рассмотрены различные механизмы формирования нано- и микроструктур на тонких металлических пленках. Приведены основные теоретические модели, используемые для

описания электронной динамики при взаимодействии лазерных УКИ с металлами\). Прежде всего, двухтемпературная модель. В главе также обсуждаются основные преимущества и недостатки метода лазерной абляции по сравнению с другими способами формирования микро- и наноструктур. Рассмотрены основные применения микро- и наноструктур в приложениях сенсорики и наноплазмоники.

Во второй главе приводится описание экспериментального оборудования, методик анализа и измерений.

В третьей главе приведены экспериментальные исследования основных стадий формирования микро- и наноструктур. Процессы вложения энергии анализируются путем измерения пропускания лазерных УКИ через серебряные пленки различной толщины (30 – 125 нм) для длин волн видимого и ближнего ИК-диапазонов. На основе экспериментально обнаруженного усиления коэффициента пропускания лазерных импульсов с длиной волны 1030 нм и теоретического моделирования в рамках двухтемпературной модели, определено значение константы электрон-электронного взаимодействия K_{ee} в случае неравновесного состояния электрон-ионной подсистемы серебра. Аналогичные исследования для видимого диапазона (515 нм) обнаруживают рост коэффициента поглощения пленок серебра по мере увеличения интенсивности лазерных импульсов, что связывается с нагревом электронного газа и дополнительной инжекцией свободных носителей из d -зон. Анализ области вложения энергии фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм, сфокусированных на поверхность серебряных пленок на стеклянных подложках микрообъективами различных числовых апертур свидетельствует о том, что существуют два режима взаимодействия УКИ с пленкой металла: 1) при сравнительно малых плотностях энергии формируются отверстия круглой формы и 2) при больших энергиях правильная круглая форма отверстий искажается. Этот факт демонстрирует влияние латерального теплопереноса на конечный размер микроотверстия в пленке. Заслуживают несомненного внимания результаты исследования стадии перераспределения материала расплава в процессе формирования нанопичков на поверхности серебряной пленки под действием фемтосекундных лазерных импульсов с длиной волны 515 нм, которые были выполнены с использованием предложенного и успешно примененного диссертантом нового оригинальный метода количественного анализа на основе энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

В четвертой главе приведены исследования применения различных дифракционно-оптических элементов (ДОЭ) для формирования микро- и наноэлементов сложной формы, функциональных массивов на их основе и высокоскоростной прямой лазерной печати на тонких металлических плёнках. Показывается расширение возможностей микрообработки с применение секторных зеркал с увеличением глубины фокуса за счет интерференции тепловых волн от «горячих» областей распределения интенсивности лазерного излучения. Мультиплексирование лазерного пучка используется в диссертационной работе для получения рекордно высокой производительности прямой лазерной печати – 25 млн. элементов в секунду – микроотверстий на поверхности металлической пленки.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Защищаемые положения являются обоснованными. Основные результаты исследований имеют высокую степень новизны, так как было впервые проведено систематическое исследование единственного варьируемого параметра — длительности лазерного импульса — на процесс формирования коллоидных растворов наночастиц и изменение морфологии аблируемой поверхности. Результаты работы являются достоверными, были представлены на ряде международных и всероссийских конференций и на семинарах ОКРФ ФИАН. По результатам диссертации опубликовано 7 статей в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и SCOPUS.

Тем не менее, текст диссертационной работы не свободен, на мой взгляд от недостатков по диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1) Таблицы 1 и 2 дублируются рисунками 3.2 и 3.10 соответственно. На мой взгляд, достаточно было бы лишь одного рисунка. Неясно, что означают сплошные и штриховые кривые на рис. 3.2

2) Формула (3.6) для интенсивности импульсов с частотой излучения ω содержит множитель $\sin^2(\omega t)$, природа которого не поясняется в тексте. Подобный подход представляется необычным, поскольку, как правило, под интенсивностью понимают усредненную по времени величину.

3) Одним из важных результатов, полученных автором, является различие в зависимостях для коэффициента пропускания пленки от интенсивности лазерного излучения для различных длин волн. Обсуждение этого эффекта представляется, однако, недостаточно подробным.

4) При анализе масштабов вложения энергии автор ограничился лишь случаем излучения с длиной волны 515 нм, не рассмотрев случая воздействия инфракрасным излучением. На мой взгляд, сравнение результатов для различных длин волн обогатило бы выполненные исследования.

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

Таким образом, можно сделать вывод, что приведенные в работе результаты представляют собой завершенное научное исследование. Диссертационная работа «Прецизионное лазерное микро- и наноструктурирование серебряных пленок» полностью 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:

Профессор физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доктор физико-математических наук



Головань Леонид Анатольевич

« 03 » июня 2021 г.

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-46-57

e-mail: golovan@physics.msu.ru

Подпись профессора физического факультета МГУ, доктора физико-математических наук Голованя Леонида Анатольевича удостоверяю

Декан физического факультета

МГУ им. М.В. Ломоносова

профессор



Н.Н. Сысоев

Список основных публикаций Л.А. Голованя по теме защищаемой диссертации в рецензируемых изданиях за последние 5 лет:

1. D. Shuleiko, M. Martyshov, D. Amasev, D. Presnov, S. Zaboltnov, L. Golovan, A. Kazanskii, P. Kashkarov. Fabricating femtosecond laser-induced periodic surface structures with electrophysical anisotropy on amorphous silicon // *Nanomaterials*. — 2021. — Vol. 11, no. 1. — P. 42-1 – 42-16.
2. A. V. Kolchin, D. V. Shuleiko, S. V. Zaboltnov, L. A. Golovan, D. E. Presnov, T. P. Kaminskaya, P. I. Lazarenko, S. A. Kozyukhin, P. K. Kashkarov. Formation of periodic surface structures in multilayer amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films irradiated by femtosecond laser pulses // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2020. — Vol. 1686. — P. 012006–1–012006–5.
3. S. V. Zaboltnov, A. V. Skobelkina, E. A. Sergeeva, D. A. Kurakina, A. V. Khilov, F. V. Kashaev, T. P. Kaminskaya, D. E. Presnov, P. D. Agrba, D. V. Shuleiko, P. K. Kashkarov, L. A. Golovan, M. Yu. Kirillin. Nanoparticles produced via laser ablation of porous silicon and silicon nanowires for optical bioimaging // *Sensors*. — 2020. — Vol. 20, no. 17. — P. 4874-1 – 4874-16.
4. А. В. Колчин, Д. В. Шулейко, А. В. Павликов, С. В. Заботнов, Л. А. Головань, Д. Е. Преснов, В. А. Володин, Г. К. Кривякин, А. А. Попов, П. К. Кашкаров. Фемтосекундный лазерный отжиг многослойных тонкопленочных структур на основе аморфных германия и кремния. // *Письма в Журнал технической физики*. — 2020. — Т. 46, № 11. — С. 43–46.
5. А. В. Скобелкина, Ф. В. Кашаев, А. В. Колчин, Д. В. Шулейко, Т. П. Каминская, Д. Е. Преснов, Л. А. Головань, П. К. Кашкаров. Формирование кремниевых наночастиц методом импульсной лазерной абляции пористого кремния в жидкостях // *Письма в Журнал технической физики*. — 2020. — Т. 46, № 14. — С. 13–16.
6. С. В. Заботнов, Д. А. Куракина, Ф. В. Кашаев, А. В. Скобелкина, А. В. Колчин, Т. П. Каминская, А. В. Хиллов, П. Д. Агрба, Е. А. Сергеева, П. К. Кашкаров, М. Ю. Кириллин, Л. А. Головань. Структурные и оптические свойства наночастиц, формируемых методом лазерной абляции пористого кремния в жидкостях; перспективы применения в биофотонике // *Квантовая электроника*. — 2020. — Т. 50, № 1. — С. 69–75.
7. F. V. Kashaev, T. P. Kaminskaya, S. V. Zaboltnov, L. A. Golovan Structural properties of silicon nanoparticles obtained via femtosecond laser ablation in gases at different pressures // *Optical and Quantum Electronics*. — 2016. — Vol. 48, no. 7. — P. 348–1–348–10.