

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Макарова Сергея Владимировича «Нано- и микроструктурирование поверхности металлов и полупроводников в воздухе при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности «лазерная физика» (01.04.21).

Диссертационная работа Макарова Сергея Владимировича посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов формирования различных типов лазерно-индуцированных поверхностных структур под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Автором исследованы процессы формирования периодических поверхностных структур (ППС) и квазиупорядоченных микроструктур, а также поверхностных наноструктур нового типа – наномасштабных ППС и наноострий в микроуглублениях на поверхности. Продемонстрирован ряд применений ППС для окрашивания и просветления поверхности, а также детектирования сверхмалых концентраций органических соединений. Несмотря на относительную простоту получения нано- и микроструктур при помощи лазерных методов, причины их формирования до сих пор остаются темой дискуссий ввиду сложности картины взаимодействия лазерных импульсов с поверхностью. Поэтому исследования в этом направлении представляются актуальными. Появление лазерных систем, генерирующих интенсивные фемтосекундные импульсы, открыло новые возможности и перспективы в исследовании механизмов формирования лазерно-индуцированных наноструктур на поверхности различных материалов, что в значительной мере реализовано автором диссертации.

Актуальность диссертационной работы Макарова С. В., являющейся развитием перспективного метода наноструктурирования поверхности металлов фемтосекундными импульсами, определяется также возможностью создания функциональных элементов плазмоники: наноантенн, плазмонных линз, дифракционных решеток. Важной перспективой применения фемтосекундного лазерного структурирования поверхности является повышение биосовместимости медицинских имплантов.

Автор поставил своей целью экспериментально изучить закономерности фемтосекундного лазерного нано- и микроструктурирования, сопоставить их с теоретическими моделями, базирующимся на существенно неоднородном распределении лазерного поля на поверхности из-за дифракции, для широкого круга важных для технологии материалов (Si, Al, Ti, GaAs, Cu) и продемонстрировать возможности

применения лазерно-индуцированных поверхностных структур для ряда оптических задач.

Диссертация состоит из 6 глав, 4 из которых содержат результаты работы, заключения и списка литературы.

В первой главе диссертации отдельно представлен подробный литературный обзор, охватывающий различные режимы формирования поверхностных структур лазерными импульсами. Автор довольно убедительно раскрыл актуальность выбранной темы и подробно описал преимущества фемтосекундных лазерных импульсов перед более длинными импульсами для задач формирования наноструктур.

Вторая глава посвящена описанию схем воздействия лазерными импульсами на поверхность, а также методам исследования полученных образцов. Более детальное описание условий различных экспериментов совместно с результатами приводится в начале каждой главы.

В третьей главе автор убедительно подтверждает ранее известный механизм появления периодических лазерно-индуцированных решеток на поверхности при помощи экспериментально полученных зависимостей их периода от длины волны и угла падения греющего лазерного излучения. Экспериментальные результаты автор сопровождает численным решением задачи дифракции. А затем при помощи полученных данных дает качественное объяснение впервые обнаруженным им наноразмерным периодическим структурам. Сделано предположение о решающей роли подповерхностной кавитации в данном процессе формирования наноразмерных периодических структур.

В четвертой главе обсуждаются фундаментальные механизмы формирования лазерно-индуцированных поверхностных микроструктур, то есть структур больше длины волны греющего лазерного излучения. Несмотря на то, что данный тип структур был довольно подробно исследован в ранних работах с применением наносекундных лазерных импульсов, автор убедительно показал, что роль дифракции падающих лазерных импульсов на микроструктурах и усиленной абляции в минимумах рельефа является доминирующей. Также продемонстрированы отличия облучения подвижной мишени от облучения неподвижной фемтосекундными лазерными импульсами.

Глава 5 посвящена изучению нового класса лазерно-индуцированных наноструктур – nanoострий. Приводятся убедительные доказательства того, что nanoострие формируется вследствие фокусировки поверхностных электромагнитных волн. Экспериментальные результаты убедительно подтверждаются модельными расчетами.

В главе 6 автор демонстрирует три возможности применения периодических поверхностных структур, генерируемых фемтосекундными лазерными импульсами:

цветовая маркировка поверхности, просветление поверхности и усиление комбинационного рассеяния от осажденного на решетке органического соединения. В качестве нового эффекта, имеющего хорошие перспективы для различных применений, представлено явление периодической химической модификации поверхности GaAs.

С фундаментальной точки зрения полученные результаты вносят существенный вклад в понимание физических процессов формирования конических микроструктур, наноострий, периодических поверхностных структур. Главным образом, установлена тесная взаимосвязь между тепловыми (абляцией, плавлением, кавитацией и др.) и оптическими (дифракцией, возбуждением поверхностных электромагнитных волн) процессами.

Приведенные в диссертации экспериментальные результаты достаточно надежны, так как для их получения использовались многократно испытанные современные методы и установки. Результаты научных исследований диссертанта являются новыми. Их новизна и достоверность подтверждаются публикациями в авторитетных научных рецензируемых изданиях. Сама диссертация представляет собой завершённую работу, состоящую из связанных одной тематикой исследований, написана ясным лаконичным языком.

По диссертационной работе можно высказать следующие замечания:

1. Формирование всех типов поверхностных структур проводилось при атмосферном давлении воздуха, в то же время изменение давления может оказывать существенное влияние на характеристики возникающего рельефа. В частности, это помогло бы пролить свет на природу формирования наноразмерных структур (нанорешеток и наноострий).
2. Несмотря на хорошее оформление работы, присутствуют орфографические ошибки на страницах 19, 27, 28, 31, 32, 88.
3. В подписи под рисунком 3.1.1.1 не сказано, что двусторонняя стрелка указывает направление поляризации падающего лазерного излучения.
4. На стр. 102 рис. 5.6.2а указан как рис. 5.5.2а., а качество рисунков 2.5 (стр.45) и 3.2.2.1 (стр.63) довольно низкое, что затрудняет анализ представленных данных.

Отмеченные недостатки, однако, носят частный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации. Научные положения, выдвинутые на защиту, представляются вполне обоснованными. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные результаты опубликованы в 13 научных статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Диссертационное исследование «Нано- и микроструктурирование поверхности металлов и полупроводников в воздухе при воздействии фемтосекундных лазерных

импульсов» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к работам на соискание научной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Макаров Сергей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «лазерная физика» - 01.04.21.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией наноструктур

и тонких пленок ИПЛИТ РАН,

д.ф.-м.н.

дата

27.10.2014

О.А. Новодворский

Подпись Олега Алексеевича Новодворского удостоверяю:

Заместитель директора ИПЛИТ РАН

по научной работе, к.ф.-м.н. В.Д.Дубров



Новодворский Олег Алексеевич

Доктор физико-математических наук, Институт Проблем Лазерных и Информационных Технологий РАН, заведующий лабораторией наноструктур и тонких пленок.

Рабочий адрес: 140700 г. Шатура, Московская область, ул. Святоозерская, 1

Рабочий телефон: +7 (496) 452 5995

Адрес электронной почты: onov@mail.ru

Список статей О.А. Новодворского, близких к теме диссертационной работы С.В. Макарова:

- 1) D. A. Zuev, O. A. Novodvorsky, E. V. Khaydukov, O. D. Khramova, A. A. Lotin, L. S. Parshina, V. V. Rocheva, V. Y. Panchenko, V. V. Dvorkin, A. Y. Poroykov, G. G. Untila, A. B. Chebotareva, T. N. Kost, M. A. Timofeyev «Fabrication of black multicrystalline silicon surface by nanosecond laser ablation». Applied Physics B, 105(3), 545-550 (2011).
- 2) D. A. Zuev, O. A. Novodvorsky, E. V. Khaydukov, O. D. Khramova, A. A. Lotin, L. S. Parshina, V. V. Rocheva, V. Ya. Panchenko, A. Yu. Poroykov, G. G. Untila, A. B. Chebotareva, T. N. Kost, M. A. Timofeev «Formation of low-reflection multicrystalline silicon surface by laser-induced structuring for application on silicon solar cells». Proceedings of SPIE 7994, P. 79940V-1-79940V-7 (2011).
- 3) Е. В. Хайдуков, О. Д. Храмова, В. В. Рочева, Д. А. Зуев, О. А. Новодворский, А. А. Лотин, Л.С. Паршина, А.Ю. Поройков, М.А. Тимофеев и Г. Г. Унтила. «Лазерное текстурирование кремния для создания солнечных элементов». Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 54(2), 26-32 (2011).
- 4) Е. В. Хайдуков, О. А. Новодворский, А. А. Лотин, В. В. Рочева, О. Д. Храмова и В. Я. Панченко «Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме». Журнал технической физики, 80(4), 59 (2010).
- 5) В.В. Рочева, Е.В. Хайдуков, О.А. Новодворский, Г.Г. Унтила, А.Ю. Поройков, Д.А. Зуев, Л.С. Паршина, А.А. Лотин, О.Д. Храмова, М.А. Тимофеев «Лазерное текстурирование мультикристаллического кремния для создания солнечных элементов». Сборник трудов XIII Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики» и IV Школы-семинара «Инновационные аспекты фундаментальных исследований» (Звенигород – Москва, 14–19 ноября 2010 года), ФИАН 2010, с. 192-194.
- 6) O.D. Khramova, E.V. Khaydukov, D.A. Zuev, V.V. Rocheva, O.A. Novodvorsky, A. Yu. Poroykov, V.V. Dvorkin, V.Ya. Panchenko, A.S. Akhmanov. «Surface modification of crystalline silicon created by the 532 nm nanosecond Nd:YAG laser pulses». Proceedings of X International Conference "Laser and Laser-Information Technologies: Fundamental Problems and Applications" (ILLA'2009, Smolyan, Bulgaria, 2009). Plovdiv, Bulgaria, 2010, p. 75-77 (ISSN 1314-068X).
- 7) Д.А. Зуев, А.А. Лотин, О.А. Новодворский, А.В. Шорохова, О.Д. Храмова «Применение лазеров в технологии солнечных элементов». Известия РАН. Серия физическая, Том 76, № 6, с. 757–760 (2012).
- 8) D.A. Zuev, O.A. Novodvorsky, A.A. Lotin, A.V. Shorokhova, O.D. Khramova, A.Yu. Poroykov, G.G. Untila, T.N. Kost, A.B. Chebotareva «Application of laser texturing method for mc-Si solar cells fabrication» Proceedings of the ALT'12, Thun, Switzerland, p. 207 (2012).
- 9) E.V. Khaydukov, O.D. Khramova, D.A. Zuev, O.A. Novodvorsky, A.A. Lotin, V.V. Rocheva, L.S. Parshina, A.Yu. Poroykov, M.A. Timofeev, G.G. Untila, V.Ya. Panchenko. «Laser-induced silicon surface structuring for solar cell application». Book of abstracts of the International Conference "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-10), St. Petersburg-Pushkin, 2010, p. 89.