

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Барминой Екатерины Владимировны «Взаимодействие лазерного излучения с многофазными конденсированными средами нанометрового масштаба», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21- Лазерная физика

Изучение процессов взаимодействия лазерного излучения с поверхностями различных материалов является одним из важных направлений современной лазерной физики. Определение параметров лазерно-индуцированных гидродинамических процессов в области воздействия позволяет с одной стороны, создать более точные гидродинамические модели течения расплава, а с другой – дает возможность управлять лазерными технологическими процессами. В настоящее время лазерные технологические комплексы активно используются в производстве, в связи с этим представляемая работа является актуальной.

Диссертационная работа Барминой Е. В. посвящена исследованию новых типов нанообъектов, образующихся при лазерном облучении твердого тела. В работе осуществлено комплексное исследование процессов лазерного формирования объектов нанометровых размеров и проведен анализ их взаимодействия с импульсным лазерным излучением. Цель работы сформулирована следующим образом: «Исследование физико-химических аспектов взаимодействия импульсного лазерного излучения с многофазными конденсированными средами, а также выявление управляющих факторов в процессах, протекающих при лазерном формировании нанообъектов и их взаимодействии с лазерным излучением в жидкостях»

Изложенные в диссертации результаты подводят итог многолетней работы автора.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы,

Общий объем диссертации составляет 255 страниц, включая 136 рисунков, 8 таблиц и библиографию из 230 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертации. Также представлен литературный обзор, из которого логично следует постановка задачи исследования.

Первая глава посвящена лазерному микроструктурированию твердых тел в воздушной среде. В главе подробно представлен сравнительный анализ известных ранее и полученных автором результатов. Барминой Е. В. предложен метод лазерного облучения металлов, позволяющий создавать неупорядоченные микроструктуры на поверхности

твердого тела, которые обеспечивают снижение коэффициента отражения оптического излучения последних в несколько раз. Это позволяет создавать подложки с поглощательной способностью, сопоставимой как с традиционными методами чернения, так и с классическим лазерным микроструктурированием, известным еще с 1990-х гг.

Вторая глава содержит результаты по исследованию формирования наноструктур при импульсном лазерном воздействии на твердое тело в воздухе и жидкости. В главе рассмотрены три типа наноструктур (самоорганизующихся, мелкомасштабных и поверхностно-периодических), образующихся при лазерной абляции твердых тел.

В этой части работы исследованы зависимости морфологии самоорганизующихся наноструктур (СОНС) от параметров воздействующего лазерного излучения на твердое тело. Для анализа топологии структур автор применяет преимущественно сканирующую электронную микроскопию с полевой эмиссией, на основании которой и определяются геометрические характеристики сформированных наноструктур.

На основе этих данных Барминой Е. В. предлагается качественная модель образования СОНС, связанная с перераспределением расплава материала под действием давления паров окружающей среды, приведены оценки этого давления. Отдельным вкладом в физику образования поверхностно-периодических структур (ППС, рипплы) является исследование процесса их формирования при воздействии лазерного излучения с пороговой плотностью энергии для выбранного материала. В этом случае исследован процесс распространения поверхностно-электромагнитных волн с малой амплитудой, которые и определяют морфологию ППС. Уникальным результатом является получение самоорганизованных ППС при воздействии лазерного излучения с азимутальной поляризацией на материал. В этом случае самоорганизация представлена в виде самопересечения ППС, ориентация которых зависит от направления поляризации воздействующего лазерного пучка. Автором экспериментально исследован процесс образования мелкомасштабных периодических структур (период 25-100 нм). Приведен анализ литературных данных и полученных результатов. В работе представлена аналитическая модель формирования такого рода наноструктур, которая хорошо согласуется с экспериментальными данными как диссертанта, так и исследователей других групп, работающих в этом направлении.

Третья глава посвящена оригинальным экспериментам по лазерному синтезу наночастиц сложного состава металлическое ядро/оксидная оболочка. Получены удлиненные наночастицы золота, которые покрыты оксидом двухвалентных ионов, а также наночастицы алюминия, инкапсулированные ядром металлического железа. Кроме того, автору удалось создать ферромагнитные нанообъекты Co-Al, обладающие

поверхностной структурой в форме додекаэдра. Морфология и структура наночастиц была установлена по полученным данным с просвечивающего электронного микроскопа и сопутствующей спектроскопии потерь энергии электронов.

В четвертой главе приведены экспериментальные результаты по составу продуктов разложения жидкостей с наночастицами под действием лазерного пробоя. Большая часть результатов получена для водных коллоидных растворов наночастиц. Установлено, что стабильными газообразными продуктами диссоциации молекул воды являются молекулярные водород и кислород. Исследована зависимость скорости генерации этих газов от количества наночастиц различных материалов в широком диапазоне их концентраций. Образование водорода и кислорода интерпретируется автором как диссоциация молекул воды, вызванная электронами плазмы лазерного пробоя. На основании литературных данных сделана оценка снизу температуры электронов плазмы, которая составляет около 20 эВ. Установлено, что третьим устойчивым продуктом диссоциации водных растворов является пероксид водорода. Показано, что выход этого продукта зависит от материала наночастиц и достигает максимальных значений для ферромагнитных наночастиц, хотя причина этого остается нераскрытой. Измерена скорость генерации радикалов как функция концентрации наночастиц в растворе. Концентрационные зависимости выхода пероксида и кислорода являются подобными, из чего сделан вывод об образовании кислорода в результате разложения пероксида водорода. Перечисленные результаты описывают процессы, протекающие при лазерном пробое водных коллоидных растворов.

В этой же главе приведены данные о генерации молекулярного водорода при лазерном пробое ряда органических жидкостей. В этом случае выход водорода оказывается на порядок больше, чем при пробое водных растворов. Инициирование лазерного пробоя органических жидкостей протекает вследствие их разложения до элементарного углерода, что увеличивает количество центров образования плазмы в процессе лазерного облучения. Выход водорода при лазерном пробое органических жидкостей ожидаемо зависит от общего числа атомов водорода на одну молекулу жидкости. Основные результаты по лазерному пробое жидкостей в присутствии наночастиц, приведенные в четвертой главе, по-видимому, получены впервые и имеют приоритетный характер.

В пятой главе рассмотрены особенности некоторых гидродинамических эффектов, вызываемых взаимодействием лазерного излучения с жидкостями. Здесь продемонстрирован эффект передачи жидкости момента вращения, связанного с воздействием сканирующего по замкнутой траектории лазерного пучка в жидкости. Такая

бесконтактная передача вращения интерпретируется автором как результат взаимодействия восходящих конвективных потоков в нагреваемой жидкости и поверхностных течений. Вместе с тем отсутствие детального описания установки, схемы эксперимента и аналитической модели наблюдаемого эффекта не дает возможности оценить правильность сделанных выводов. По моему мнению, основным результатом этой главы является наблюдение эффекта самоорганизации пузырьков водорода над микроструктурированной лазерным излучением поверхностью в растворе жидкого травителя. Эффект наблюдается в отсутствие лазерного излучения, но проявляется как раз в тех областях подложки, которая была облучена лазерным пучком. Это те же поверхности, оптические свойства которых были рассмотрены в первой главе диссертации. Поверхность металла после лазерной абляции является источником микропузырьков водорода. По мнению автора, такая самоорганизация обусловлена обратной связью между плотностью пузырьков и скоростью восходящих потоков в жидкости, создаваемых ими. В результате этого пузырьки образуют над поверхностью металла квазистационарные распределения плотности, не совпадающие с геометрией облученной лазером области, но определяемые ее геометрией. Экспериментально показано, что если конфигурация облученной лазерным пучком области имеет вихревую структуру, то восходящие пузырьки водорода могут приводить во вращение всю жидкость в сосуде. В заключении этого раздела проведено моделирование процесса самоорганизации, результаты которого качественно совпадают с экспериментально наблюдаемыми структурами. Эти эффекты, по-видимому, не имеют никакого практического значения, но представляют собой новые интересные закономерности.

В заключении сформулированы основные результаты и приведен список цитируемой литературы.

При наличии большого количества экспериментального материала работа не свободна от недостатков, среди которых следует отметить основные:

1. При анализе рельефа поверхности с помощью РЭМ не описана методика определения размеров наноструктур по нормали к поверхности. Как правило РЭМ не дает возможности однозначно определить эти размеры наноструктур, без специальных методик измерений и обработки (см. напр.: Computational Visual Media, 3(2):107–129, 2017 и цитируемую там литературу) о которых нечего не сказано в диссертации, поэтому приведенные параметры амплитуд (высот) объектов нельзя считать достаточно обоснованными.
2. Большинство проводимых экспериментов не сопровождается описанием схем их реализации, методик и ошибок измерения, что затрудняет оценку достоверности результатов, представленных в диссертации.

3. Отсутствие убедительных теоретических моделей большинства наблюдаемых явлений не позволяет оценить в какой степени изменение параметров экспериментов влияет на получаемые результаты.
4. В разделе 2.1 при анализе антифрикционных свойств наноструктурированных поверхностей отсутствует описание каких-либо модельных экспериментов по влиянию морфологии лазерно-наноструктурированных поверхностей на их антифрикционные свойства и коэффициент трения.
5. Отсутствие в разделе 5.1 описания установки, схемы эксперимента и аналитической модели наблюдаемого эффекта не дает возможности оценить правильность сделанных выводов. В частности, при интерпретации зависимости угловой скорости вращения мишени от линейной скорости перемещения лазерного пучка на рис. 5.1.2. диссертации автор не комментирует наличие максимума скорости вращения мишени вблизи скорости перемещения пучка около 250 мм/с и наличие последующего минимума в исследуемой зависимости.

Отмеченные недостатки, не смотря на обилие экспериментального материала, снижают ценность диссертационной работы. Вместе с тем её актуальность, практическая значимость и новизна полученных результатов позволяют считать автора диссертации высококвалифицированным специалистом.

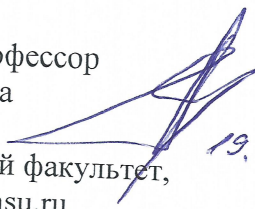
Материалы диссертации достаточно полно представлены в рецензируемых журналах.

Учитывая вышеизложенное, считаю, что диссертация удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Бармина Екатерина Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21- Лазерная физика.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой квантовой электроники, профессор
физического факультета МГУ им М. В. Ломоносова

119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, физический факультет,
тел: +7(495) 939 1104, e-mail: panov@spmlab.phys.msu.ru.



В. И. Панов

19.04.2019г.

Подпись проф. В. И. Панова удостоверено:

Декан физического факультета
МГУ им М. В. Ломоносова, профессор



Н. Н. Сысоев