

## ОТЗЫВ

На автореферат диссертации по специальности 01.04.21 – лазерная физика  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
«Взаимодействие лазерного излучения с многофазными конденсированными средами  
нанометрового масштаба»  
Барминой Екатерины Владимировны

Исследование взаимодействия лазерного излучения с многофазными средами сложная задача, так как вероятными становятся многие конкурирующий между собой различные явления и механизмы. Многочисленные процессы происходят как во время лазерного импульса, так и накапливаются при периодическом воздействии. Во время каждого импульса может происходить оптический пробой, абляция, образование жидкой фазы, гидродинамическое воздействие на неё, химическое травление, генерация поверхностных волн и т.д. При периодическом взаимодействии формирование микро- и наноструктур как связаны с длиной волны лазера, так и с определяющимися иными физическими и химическими процессами. Вследствие этого будет меняться коэффициент поглощения излучения и, следовательно, условия взаимодействия.

Чтобы разобраться в физике процессов диссертант проявляет немало изобретательности. Меняет длины волн излучателей, длительность импульсов и их количество, среду одного из полупространств, на границе которых изучается взаимодействие. Наносит на исследуемую поверхность с помощью электронной литографии структуры, провоцирующие или подавляющие те или иные механизмы взаимодействия. В результате на все поставленные вопросы удается получить ответ определенно и достоверно.

На уровне понимания физики диссертант не останавливается, а в ряде случаев находит и применение структурированным материалам. Увеличение поглощения обеспечивает увеличение КПД кремниевых солнечных батарей, плазмонный резонанс на наночастицах золота используется для гигантского ВКР и анализа органики, наноструктуры на вольфраме для уменьшения работы выхода термокатодов и т.п.

Я получил удовольствие от чтения реферата и считаю, Диссертационный Совет поступит правильно, если присудит Е.В.Барминой учёную степень доктора физико-математических наук.

С.В.Гапонов



14.04.2019г.

Гапонов Сергей Викторович  
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН  
Советник РАН

Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт  
прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН)  
603087, Нижегородская обл., Кстовский район, д. Афонино, ул. Академическая, д.7  
Тел.: 831 417 94 65  
Эл. почта: [svg@ipmras.ru](mailto:svg@ipmras.ru)

## ОТЗЫВ

### на автореферат диссертации Барминой Екатерины Владимировны

«Взаимодействие лазерного излучения с многофазными конденсированными средами нанометрового масштаба», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертация Барминой Е.В. посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию процессов импульсной лазерной абляции твердых тел в жидкостях, приводящих к формированию наноразмерных объектов на поверхности облучаемых материалов и твердых наночастиц в форме коллоидных растворов. Ряд важных результатов получен также в условиях абляции металлов и кремния на воздухе. В последние десятилетия метод лазерной абляции в жидкостях зарекомендовал себя как один из наиболее эффективных и гибких способов синтеза наночастиц с необычными характеристиками и уникальной морфологией, недоступными для других методов синтеза. Однако до настоящего времени физика и химия процессов при лазерном облучении твердых материалов в жидкостях остаются недостаточно изученными, что обусловлено большой сложностью явления, включающего не только поглощение лазерной энергии твердым объектом с последующими фазовыми превращениями, но и многообразием процессов в окружающей жидкости и их значительным влиянием на динамику поведения облучаемого материала. Детальное изучение этого явления необходимо для достижения полного контроля над лазерным синтезом желаемых структур, требующего нанометровой точности и исключительно высокой воспроизводимости. В процессе таких исследований ученые часто обнаруживают необычные свойства получаемых нанообъектов, открывающие новые возможности для их применений, что также продемонстрировано в рамках данной работы. Поэтому диссертационная работа Барминой Е.В. несомненно является **актуальной**.

#### **Научная новизна исследования и полученных результатов.**

В диссертационной работе Барминой Е.В. проведено систематическое исследование формирования нанообъектов (поверхностных структур и наночастиц) при воздействии импульсного лазерного излучения фемто- и пикосекундной длительности на ряд металлов и кремний. Показано, что формируемые наноструктуры при облучении материалов в жидкостях можно разделить на две категории, самоорганизующиеся (не зависящие от поляризации лазерного излучения) и мелкомасштабные, период которых определяется модуляцией расплава термокапиллярными возмущениями. С помощью теоретической модели выявлены механизмы формирования таких структур.

Исключительно важной частью работы является изучение плазмы пробоя при абляции в жидкости твердых образцов и воздействии лазерным излучением на коллоидные растворы. Вопросы о роли плазмы при абляции в жидкостях изучены далеко недостаточно. С одной стороны, возникновение плазмы при воздействии ультракоротких импульсов лазерного излучения на твердые и жидкие среды является неизбежным процессом в режимах абляции. С другой стороны, возникающая плазма меняет характер взаимодействия излучения с веществом. В диссертационной работе впервые исследован вопрос формирования плазмы при воздействии излучения на коллоидные растворы с учетом сопутствующей диссоциации жидкостей. Показано, что наночастицы, взвешенные в растворе, являются центрами, инициирующими формирование плазмы, и что выход продуктов диссоциации зависит от материала наночастиц, их концентрации в растворе и параметров воздействующего излучения.

В работе получен целый ряд новых наноструктурных объектов, которые могут найти применение в различных приложениях: упорядоченные ряды наноструктур в углублениях пре-структурированной поверхности, удлинённые наночастицы золота, необычные по морфологии композитные частицы Fe-Al и Co-Al. Сделаны убедительные выводы о механизме их формирования.

#### **Научная и практическая значимость.**

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют знания о процессах, происходящих при воздействии лазерного излучения на материалы в жидких средах. Особенно это относится к данным по зависимостям диссоциации жидкости при облучении коллоидов от материала наночастиц, их концентрации в растворе и параметров воздействующего излучения. Практическая значимость работы не вызывает сомнений, поскольку ее результаты уже легли в основу международного патента. Кроме того, результаты работы могут найти применение в солнечной энергетике (структурированный кремний), микроэлектронике (уменьшение работы выхода при структурировании катода из вольфрама), трибологии (улучшение антифрикционных свойств поверхностей при их наноструктурировании).

Полученные результаты достаточно полно опубликованы в престижных российских и международных научных журналах.

В качестве замечаний по автореферату можно отметить следующее:

1. В первой главе описаны экспериментальные исследования наноструктурирования металлов и кремния наносекундным лазерным излучением на воздухе. Показано, что формирование конусообразных и неупорядоченных структур приводит к значительному снижению коэффициента отражения ряда металлов и кремния, что является известным эффектом. С другой стороны, как следует из автореферата, в работе получены рекордно низкие значения коэффициента зеркального отражения вследствие комбинации лазерного микроструктурирования и анодирования, однако механизмы такого усиления эффекта не прокомментированы.
2. При описании первой главы также отмечено, что нанесение конусообразных структур на кремний приводит к увеличению эффективности преобразования световой энергии в электрическую на 20%. Чем обусловлено такое увеличение и как эти результаты отличаются от известных данных, например, по исследованию «черного кремния» группой Мазура (США)? Насколько поверхность оксидирована? Используется ли допирование для достижения такой эффективности?
3. В целом из автореферата неясно, как влияет окружающая среда на состав получаемых наноструктур.

Возможно, что в диссертационной работе имеются ответы на перечисленные вопросы, однако в автореферате важный результат об изменении поглотительной способности облучаемых материалов описан слишком сжато.

Отмеченные замечания не снижают ценности диссертации. Содержание автореферата свидетельствует о том, что диссертационная работа Барминой Е.В. выполнена на высоком научном уровне и носит завершённый характер. Представленная диссертационная работа по своей актуальности, научной новизне и значимости полученных результатов отвечает всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Бармина Екатерина Владимировна заслуживает



## Отзыв

на автореферат диссертации Барминой Екатерины Владимировны  
«Взаимодействие лазерного излучения с многофазными  
конденсированными средами нанометрового масштаба»,  
представленной на соискание ученой степени доктора физико-  
математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Диссертация Барминой Екатерины Владимировны «Взаимодействие лазерного излучения с многофазными конденсированными средами нанометрового масштаба» посвящена детальному и всестороннему исследованию процесса образования нанообъектов при лазерной абляции твердых тел и их последующему взаимодействию с лазерным излучением. Потребность в современных, высокоэффективных научно-технических решениях, направленных на расширение областей применения лазеров, вынуждает ставить все новые задачи в исследуемой области, разрабатывать новые подходы, выявлять взаимосвязи и развивать теорию, описывающую полученные результаты. На основе критического анализа отечественных и зарубежных публикаций автор четко сформулировала цель и задачи диссертационной работы. А именно, ею исследованы физико-химические аспекты взаимодействия лазерного излучения с многофазными конденсированными средами и последующее формирование нанообъектов. Е.В. Барминой сделан существенный вклад в исследования по лазерному образованию наночастиц и микроструктур с уникальной морфологией.

Бармина Е.В. стояла у истоков формирования новой области лазерного структурирования твердых тел: образование самоорганизующихся и мелкомасштабных наноструктур. Ею были получены основные результаты по всестороннему исследованию физико-химических свойств наноструктур и установлены основные факторы, определяющие их морфологию. Это привело к развитию технологии направленного лазерного облучения твердых тел для дистанционного структурирования объектов любой формы и размера в воздухе. Использование этой технологии позволило существенным образом улучшить характеристики термоэмиссионных катодов, светодиодов, элементов солнечных батарей и объектов скольжения.

Судя по автореферату, важным достижением являются результаты исследования взаимодействия лазерного излучения с наночастицами, вследствие чего изменяются химические свойства жидкостей, в которых протекало облучение. В этом случае впервые сделана оценка температуры электронов плазмы, образующейся вокруг наночастиц, и показаны альтернативные методы получения молекулярного водорода, кислорода и перекиси водорода при диссоциации воды и органических жидкостей под действием электронного удара. Всестороннее и

детальное рассмотрение процессов, протекающих в микро- и наномасштабе, представленное в диссертационной работе, является существенным вкладом в динамику развития лазерной абляции и гидродинамических процессов, происходящих при этом.

Вышесказанное позволяет утверждать, что работа обладает высокой научно-практической ценностью и новизной. Результаты могут быть применены как для фундаментальных исследований в области лазерного нано-структурирования, так и для решения прикладных задач, связанных с изменением свойств объектов в нанометровом масштабе.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в автореферате диссертации, не вызывает сомнений и обеспечена применением современных методов физико-химического исследования, приборов, имеющих необходимые метрологические характеристики. Наблюдаемые физические явления подтверждены детальным теоретическим анализом и их совпадением с результатами, полученными другими исследователями. Практически все исследованные автором физические эффекты и явления при лазерном взаимодействии со средами нанометрического масштаба являются предметом дальнейших исследований и разработок в других лазерных центрах. Публикации Е.В. Барминой хорошо известны в научном сообществе и неоднократно цитировались.

Содержание автореферата соответствует специальности, по которой диссертация представляется к защите.

Автореферат написан грамотным русским и ясным научным языком и практически свободен от стилистических и грамматических ошибок за исключением единичных случаев пропуска или повтора слов в предложениях (стр. 7 и 8) и несогласования падежей (стр. 13). Автореферат дает полное представление о результатах и защищаемых научных положениях.

По существу работы хотелось бы отметить ряд замечаний:

- автор не объясняет механизм процесса объединения наночастиц в удлиненные цепочки;
- в автореферате наряду с перечнем конкретным выводов по работе не отмечен общий вывод о том, что заложены основы нового лазерного метода наноструктурирования твердых тел и модификации наноматериалов;
- не указаны области применения подложек с низким коэффициентом зеркального отражения, помимо их использования в качестве основы элементов солнечных батарей;
- возможно, следовало оценить экономическую эффективность нового лазерного метода «чернения» кремниевых солнечных батарей;

- в автореферате упомянуто, что наноструктуры могут усиливать электромагнитное поле на несколько порядков. Это может быть интересно с точки зрения технологии лазерного структурирования оболочек мишеней ЛТС.

Отмеченные замечания и комментарии носят рекомендательный характер, не снижают важности полученных результатов и ценности работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как решение проблемы, имеющей важное научное и практическое значение, что соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 28.08.2017 г.), а ее автор Бармина Екатерина Владимировна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Генеральный конструктор по лазерным системам,  
заместитель директора ФГУП «РФЯЦ-  
ВНИИЭФ» Госкорпорации по атомной  
энергии «Росатом» по лазерно-  
физическому направлению, директор  
Института лазерно-физических  
исследований, академик РАН,  
профессор по кафедре «Физика плазмы»,  
доктор физико-математических наук,  
Гаранин Сергей Григорьевич  
607188, Нижегородская обл., г. Саров,  
пр. Мира, д.37, тел. +7(83130)-4-46-10,  
e-mail: [garanin@vniief.ru](mailto:garanin@vniief.ru)



Подпись С.Г. Гаранина удостоверяю:

ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
кандидат физико-математических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "В.В. Хижняков".

В.В. Хижняков

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Барминой Екатерины Владимировны «Взаимодействие лазерного излучения с многофазными конденсированными средами нанометрового масштаба», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Диссертационная работа Е.В. Барминой посвящена одному из активно развивающихся направлений современной лазерной физики, а именно: созданию наночастиц различных геометрий и наноструктурированных поверхностей лазерным излучением, а также взаимодействию лазерного излучения с нанообъектами на воздухе и в жидкостях. Уникальность методов и физико-химических свойств нанообъектов, получаемых с помощью облучения твердых тел, определяется химической чистотой целевого продукта, большим разнообразием получаемой морфологии, простотой реализации, скоростью и практичностью, связанными с низкими требованиями к подготовке обрабатываемых материалов.

Следует отметить, что несмотря на большое число работ в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, единое описание происходящих процессов: наноструктурирования мишеней, получения частиц, действия излучения на коллоиды – пока отсутствует, что требует получения большего числа эмпирических данных об этих процессах. В этом аспекте диссертация Барминой Е.В. является безусловно актуальным и современным исследованием.

В диссертационной работе получен целый ряд интересных результатов. Так, экспериментально продемонстрировано уменьшение коэффициента отражения некоторых материалов до 180 раз с помощью их многоимпульсной лазерной абляции. Получены интересные результаты в отношении наноструктурирования кремния, реализован метод лазерной двойной экспозиции наноструктур на поверхностях SiC, W, Si. Исследован процесс образования мелкомасштабных периодических структур при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на металлы в жидкостях и на воздухе. Показано, что возникновение мелкомасштабных периодических структур связано с геометрией ванны расплава и термокапиллярной неустойчивостью типа Бенара-Марангони. Получены наночастицы уникальных морфологий. Обнаружен новый тип диссипативных структур, образованных пузырьками водорода в процессе химического травления лазерно-модифицированных материалов и многие другие результаты.

Считаю необходимым отметить новизну результатов и особо отметить их высокую практическую значимость.

Как и любая объёмная работа, автореферат диссертации содержит несколько неудачных формулировок и опечаток, которые не затеняют суть работы. Замечаний по существу не имеется.

На основании данных автореферата диссертационная работа Барминой Екатерины Владимировны соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21-лазерная физика.

Кандидат физико-математических,  
научный сотрудник

*Игорь*

Торопов Никита Александрович

Центр «Информационные оптические технологии»,  
федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский  
национальный исследовательский университет информационных  
технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО);  
Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101,  
+7(812)4571542, +7(965)0079864, toropov@corp.ifmo.ru



*Торопова Н. А.*

*Мишельева В. М.*

*08.04.2019.*