

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д 002.034.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ АНАЛИТИЧЕСКОГО
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИАП РАН),
Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____

решение Диссертационного совета от «22» ноября 2019 г. №16

о присуждении Хасая Радмиру Рюриковичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Экспериментальная установка для прямого лазерного микро – и наноструктурирования рельефа поверхности твердых тел» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 20.09.2019 г., протокол № 9 Диссертационным советом Д002.034.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), 190103, Санкт-Петербург, Рижский пр. 26, приказ 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель, Хасая Радмир Рюрикович, 1983 года рождения, окончил в 2008 году Московский инженерно-физический институт (государственный университет) «МИФИ», в 2011 году окончил аспирантуру Института электрофизики и электроэнергетики РАН (ИЭЭ РАН).

Диссертация выполнена в Институте электрофизики и электроэнергетики РАН.

Научный руководитель: Ямщиков Владимир Александрович доктор технических наук, член-корр. РАН, директор филиала ИЭЭ РАН

Официальные оппоненты:

1. Поволоцкий Алексей Валерьевич, доктор физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, доцент кафедры лазерной химии и лазерного материаловедения;
2. Дунаевский Михаил Сергеевич, кандидат физико-математических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории оптики поверхности
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт Проблем Машиноведения Российской Академии Наук (ИПМаш РАН), г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, подписанном заведующим лабораторией модифицирования поверхностей материалов ИПМаш РАН, Кузнецовым Вячеславом Геннадиевичем, доктором технических наук, утвержденном ВРИО директора ИПМаш РАН Полянским Владимиром Анатольевичем, доктором технических наук, указала что диссертация Хасая Р.Р. соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01, и отметила следующие замечания:

- 1). Для формирования субмикро- и наноструктур автор диссертации использовал различные материалы, такие как: германий, никель, силицид платины, нитрид кремния, нержавеющая сталь, титан и оксид алюминия. Выбор данных материалов, по мнению автора (стр. 16), был продиктован тем, что они наиболее часто используются в науке, технике и промышленности. Такое заявление является необоснованным.
- 2). На стр. 10 диссертации автор констатирует, что «Множество работ по прямому лазерному наноструктурированию было выполнено ранее главным образом с применением пико- и фемтосекундных лазеров. Однако, для практического применения целесообразно рассмотреть возможность использования более доступных и простых в эксплуатации лазерных источников, каковыми являются наносекундные лазеры». Такая целесообразность была показана до автора данной диссертации. Хотелось бы, чтобы в диссертации была отражена научная сторона процесса микро- и наноструктурирования рельефа поверхности при переходе от пико- и фемтосекундных лазеров к наносекундным.
- 3). К нанотехнологиям не относятся работы с материалами, размеры которых составляют сотни нанометров (стр. 21).
- 4). В диссертационной работе не обсуждаются контролируемость и воспроизводимость процессов лазерного наноструктурирования. На графиках отсутствуют доверительные интервалы параметров.
- 5). Диссертация не лишена грамматических, стилистических ошибок и неточностей (стр. 12, 15, 31, 45, 72, 137, 140 и др.)

Соискатель имеет **14 (четырнадцать)** опубликованных работ, в том числе, по теме диссертации **14 (четырнадцать)** работ, опубликованы в рецензируемых научных изданиях; из них **5 (пять)** работ входящих в Перечень ВАК РФ и индексируемых в Международных библиометрических базах WoS и Scopus, а также **9 (девять)**

публикаций в материалах всероссийских и международных научных конференций. К наиболее значительным работам, отражающим основное содержание диссертации, относятся:

1. Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., **Хасая Р.Р.**, Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Электроразрядный ВУФ лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника 39, № 8, 2009, С. 714-718
2. Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., **Хасая Р.Р.**, Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Токарев В.Н. Экспериментальная установка для прямого лазерного микро- и наноструктурирования поверхности твердых тел // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 311-316.
3. Железнов Ю.А., **Хасая Р.Р.**, Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Эффективный метод увеличения длительности импульса излучения электроразрядного KrF лазера // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 85-88.
4. Железнов Ю.А., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., **Хасая Р.Р.**, Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Обработка поверхности титана наносекундным лазерным излучением // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1 (13). С. 45-48.
5. Ёлкин В.Н., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., **Хасая Р.Р.**, Хомич Ю.В., Ямщиков В.А. Влияние облучения наносекундными лазерными импульсами на структуру поверхности сплавов металлов // Физика и химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 5-12
6. Tokarev V.N., Shmakov V.A., **Khasaya R.R.**, Mikolutskiy S.I., Nebogatkin S.V., Khomich V.Yu., Yamshchikov V.A. Review of methods of direct laser nanostructuring technological materials // Proceedings of the 29th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electrooptics, 2010, Anaheim, USA, P. 1257-1265
7. **Khasaya R. R.**, Malashin M. V., Khomich V. Yu., Yamschikov V. A. Possibility of increasing of the excimer lasers emission time duration // Proceedings of ILLA<L 2009, March 2010 P. 205-216
8. **Khasaya R.R.**, Khomich V.Yu., Mikolutskiy S.I., Moshkunov S.I., Shmakov V.A., Tokarev V.N., Yamshchikov V.A. Direct laser nanostructuring of the material surface by the 193 nm and 248 nm wavelength irradiation // Book of abstracts 7th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies - NN10, 2010, Halkidiki, Greece, P. 87
9. **R.R. Khasaya**, Yu.V. Khomich, S.I. Mikolutskiy. Influence of nanosecond laser radiation on the surface structure of metals // Proceedings of the 14th Sino-Russian symposium on Advanced Materials and Technology, 2017, Sanya, China, P. 319-324
10. S.I. Mikolutskiy, **R.R. Khasaya**, Yu. V. Khomich, V.A. Yamshchikov. Formation of various types of nanostructures on germanium surface by nanosecond laser pulses // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 987, p. 012007.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. От Поволоцкого Алексея Валерьевича, доктора физико-математических наук, Санкт-Петербургский государственный университет, доцента кафедры лазерной химии и лазерного материаловедения. Замечания:

1) В тексте диссертации при сравнении результатов структурирования поверхности лазерными импульсами различной длительности не рассматриваются вопросы эффективности нагрева и, как следствие, эффективности процесса лазерной абляции при использовании фемтосекундных и пикосекундных импульсов. Такие данные позволили бы подчеркнуть важность использования наносекундных лазеров для метода лазерного структурирования поверхности в промышленных масштабах.

2) Экспериментальные графики представлены в основном без погрешностей, что затрудняет оценку достоверности получаемых на их основе выводов. Например, на рисунках 3.16 и 3.17 по оси абсцисс значения представлены с точностью до 9 знака. Какова погрешность определения логарифма энергии, каков физический смысл представленных значений?

3) На изображениях, полученных при помощи атомно-силового микроскопа, размерность на шкалах указана как «нМ». Вероятно, данное обозначение следует принимать как «нм»?

2. От Дунаевского Михаила Сергеевича, кандидата физико-математических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, старшего научного сотрудника лаборатории оптики поверхности. Замечания

1) В рамках данной работы исследовалось воздействие лазерного облучения на следующие материалы: "германий, никель, силицид платины, нитрид кремния, нержавеющая сталь и титан". Не вполне понятно, чем был обусловлен выбор именно такого набора материалов?

2) В диссертации облучались объёмные образцы. Рассматривалась ли автором возможность применения этого метода для облучения тонких плёнок на подложках? Возможно в этом случае удалось бы получить "меньшие по размерам" наноструктуры на поверхности.

3) В главе 2 автор выполнил существенную работу по реализации облучения поверхности задержанными относительно друг друга наносекундными лазерными импульсами с различными длинами волн. Автор особо подчеркивает, что такое облучение должно существенно влиять на характер и морфологию образующихся поверхностных структур. Однако, в диссертации не приведено ни одного экспериментального результата с таким облучением. Почему?

4) В ходе экспериментов по лазерному облучению поверхностей твёрдых тел автором были обнаружены наноструктуры - в виде гексагональных ячеек на германии и в виде

эллиптических нанократеров на нержавеющей стали. Есть ли у автора какое-то объяснение причин возникновения таких наноструктур

5) При исследовании наноструктур, полученных лазерным облучением германия (рис.4.10), автор предполагает, что эти наноструктуры - окисленный германий. Привлекались ли методы химанализа для определения состава наноструктур в этих областях?

6) Автору, возможно, стоило бы рядом с АСМ изображениями приводить профили сечений. Это бы упростило восприятие характерных масштабов рельефа исследуемых поверхностей до и после воздействия.

3. От Бакшта Федора Григорьевича, доктора физико-математических наук, профессора, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, главного научного сотрудника. Замечания:

1) В автореферате представлены результаты только двух облученных материалов, хотя в заключении указано до шести различных материалов. Желательно также указать, по какой причине были выбраны именно данные материалы и сформулировать обобщенный результат оценки по остальным материалам.

2) Автору следовало бы указать, какое преимущество имеют системы питания на основе IGBT транзисторов для источников лазерного излучения, использованных в данной работе.

4. От Борейшо Анатолия Сергеевича, доктора технических наук, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, заведующего кафедрой лазерной техники. Замечания:

1) В автореферате приводятся пример создания микро- и наноструктур на поверхности германия и нержавеющей стали, без всякого указания на то, по какой причине были выбраны именно эти материалы.

2) Также представляется целесообразным сравнить образующиеся в этих материалах структуры и указать, насколько при этом различаются параметры импульсов облучения.

3) В тексте содержится ряд досадных опечаток и ошибок.

5. От Соколовой Марины Владимировны, кандидата технических наук, Национальный исследовательский университет «МЭИ», старшего научного сотрудника кафедры техники и электрофизики высоких напряжений. Замечание:

Из автореферата неясно, насколько подробно автором рассмотрена возможность возникновения высоких температурных градиентов за наносекундные времена воздействия импульсов лазерного излучения.

6. От Макарова Сергея Владимировича, доктора физико-математических наук, Университет ИТМО, главного научного сотрудника, заведующего лабораторией

гибридной нанофотоники и оптоэлектроники физико-технического факультета.
Замечания:

1) не проведено достаточное сравнение с другими аналогичными результатами по формированию поверхностных нано- и микроструктур. В частности, механизмы формирования различных типов поверхностного рельефа достаточно подробно обсуждались в классических работах [С.А. Ахманов и др. УФН 147(12), 675-745 (1985); J.F. Young, et al. Physical Review B 27 (2), 1155 (1983); S.I. Dolgaev et al. "Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids." Applied Physics A 73(2), 177-181 (2001); Н.И. Коротеев, и И.Л. Шумай, «Физика мощного лазерного излучения» Наука (1991); D. Bäuerle «Laser processing and chemistry» Springer (2013)]. Раскрытие природы формирования появления тех или иных типов структур облегчило бы процесс оптимизации процесса их создания.

2) Также не достает обобщающей таблицы или схемы, суммирующей все то многообразие полученных нано- и микроструктур при различных условия лазерного воздействия. Это бы помогло лучше оценить новизну некоторых результатов работы.

3) В работе с явно техническим уклоном продемонстрирован ряд новых наноструктур, полученных методом лазерной абляции, но не приведены конкретные примеры их использования, что, несомненно, украсило бы работу.

7. От Агеева Эдуарда Игоревича, кандидата технических наук, университет ИТМО, инженера 1 категории физико-технического факультета. Без замечаний.

Все отзывы положительные.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается большим опытом работы в областях, относящихся к проблематике диссертационной работы, таких как: методы экспериментальной физики, лазерное индуцирование поверхностных структур, технологии обработки поверхности металлов, технологии наноструктурирования, плазмоника

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

показана теоретически (на основе представлений о развитии лазерно-индуцированной неустойчивости рельефа поверхности) и экспериментально обоснованность использования наносекундных лазерных источников, генерирующих ВУФ и УФ излучения для получения нано-, субмикро- и микроструктур с контролируемыми параметрами при облучении поверхности твердых тел;

реализован метод прямого лазерного наноструктурирования поверхности твердых материалов с интенсивным локальным воздействием, позволяющий благодаря

сочетанию короткой длины волны излучения, поглощающейся в микрометровом слое и наносекундной длительности импульсов, оказывать воздействие на приповерхностный слой, в котором создаются высокие температурные градиенты, способствующие образованию новых микро и наноструктур;

для реализации данного метода создана экспериментальная установка, позволяющая облучать одним лазером или синхронизированными импульсами от разных лазеров с регулируемой задержкой между импульсами, от ВУФ до видимого диапазона излучения, с длительностью импульсов от 5 до 20 нс, частотой следования импульсов до 15 кГц, плотностью энергии до 10 Дж/см²;

предложен оригинальный подход увеличения длительности импульсов излучения электроразрядного лазера, заключающийся в накачке активной среды периодически затухающим напряжением на разрядном промежутке;

установлены факторы и условия, влияющие на развитие субмикро- и наноструктур при облучении поверхности наносекундными лазерными импульсами. С использованием методики атомно-силовой микроскопии изучены формы и размеры субмикро- и наноструктур, образованных на поверхности облученных материалов, проанализированы и определены параметры, влияющие на их морфологию;

апробирована и внедрена новая уникальная экспериментальная установка на основе импульсно-периодических наносекундных лазеров с длинами волн 193 нм, 355 нм, 510 нм и 578 нм, позволяющая облучать и модифицировать поверхности материалов в широком диапазоне изменения числа импульсов и плотности энергии лазерного пучка.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что применительно к проблематике диссертации результативно, с получением обладающих новизной результатов:

доказана необходимость создания установки для формирования поверхностных субмикро- и наноструктур на основе трех лазеров разных типов и с различными параметрами облучения (количество импульсов, частота следования импульсов, средняя плотность энергии импульса и длина волны излучения);

предложено оригинальное решение задачи увеличения длительности импульса излучения электроразрядных эксимерных лазеров с накачкой активной среды в режиме периодически затухающего напряжения на разрядном промежутке, что расширяет возможности разработки газоразрядных, импульсных источников излучения и систем накачки лазеров с улучшенными техническими характеристиками.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

определены параметры лазерного пучка облучения с использованием созданной установки, обеспечивающие условия формирования субмикро- и наноструктур при неподвижном пятне облучения и сканировании пучка по поверхности, что открывает перспективы ее использования для улучшения процессов обработки поверхностей различного типа;

создана система практических рекомендаций по выбору параметров облучения в неподвижном пятне для получения субмикро- и наноструктур: длительность лазерных импульсов излучения от 5 до 20 нс, количество импульсов от 10 до 1000, средняя плотность энергии 2,5 до 10 Дж/см²;

представлены предложения по применению созданной установки для изучения процессов и механизмов взаимодействия наносекундного лазерного излучения и поверхности твердых тел в атмосферном воздухе.

Созданная установка **используется** в рамках исследования по увеличению прочности заготовок под диффузионную сварку в АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала».

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что все результаты получены на высокоточном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования для различных материалов. Теория построена на известных законах оптики, физических процессах, описывающих лазерно-индуцированные изменения рельефа поверхности, и не противоречит ранее опубликованным экспериментальным данным по теме диссертации. Установлено, что сравнение результатов по облучению поверхности твердых тел наносекундными лазерными импульсами показало отсутствие противоречий, как качественных, так и количественных с результатами, представленными в независимых источниках по облучению твердых тел импульсами лазерного излучения.

Личный вклад соискателя заключается в формулировке цели, задач и разработке методики проведения экспериментальных исследований по облучению поверхности твердых материалов; выявлении на основе проведенного анализа литературных данных наиболее эффективных путей развития методов и методик создания функциональных нано- и микроструктур широкого назначения; создании экспериментальной установки для получения субмикро- и наноструктур при облучении поверхности твердых тел наносекундными лазерными импульсами. Автором был экспериментально исследован новый метод увеличения длительности

импульсов излучения эксимерного лазера, исследованы зависимости длительности и энергии импульса излучения от состава и давления газовой смеси на разрядном промежутке. Автор принимал личное участие в апробации полученных результатов, а также подготовил основные публикации по теме диссертации.

На заседании 22.11.2019 г. Диссертационный совет принял решение присудить Хасая Радмиру Рюриковичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 17 докторов наук, участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 17, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель Диссертационного совета,
д.т.н., проф.



В.Е. Курочкин

Ученый секретарь Диссертационного совета,
д.ф.-м.н.



А.Л. Буляница

