

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИЭЭ РАН

Хомич В. Ю.



«03» 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (ИЭЭ РАН)

Диссертационная работа «Экспериментальная установка для прямого лазерного микро- и наноструктурирования рельефа поверхности твердых тел» выполнена в лаборатории №3 газоразрядной и лазерной техники ИЭЭ РАН.

В период подготовки диссертации соискатель Хасая Радмир Рюрикович работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, в лаборатории №3 в должности младшего научного сотрудника.

В 2008 г. окончил Московский инженерно-физический институт (Государственный университет) по специальности «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2013 году. Экзамен по специальности сдан в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте аналитического приборостроения Российской академии наук.

Научный руководитель:

- доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Ямщиков Владимир Александрович, директор филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук

Диссертация посвящена разработке и созданию экспериментальной установки для реализации метода прямого лазерного субмикро- и наноструктурирования поверхности твердых материалов, исследованиям с помощью атомно-силовой микроскопии характерных особенностей и условий возникновения нанорельефов на поверхности твердых тел, а также влияния параметров облучения наносекундными лазерными импульсами на размеры и форму получаемых структур. Её актуальность обусловлена необходимостью создания новой экспериментальной установки для проведения экспериментальных исследований по получению структурированных материалов обладающими улучшенными свойствами поверхности, имеющий широкие перспективы применения в различных областях науки и техники, а также развития лазерных методов нано и микроструктурирования поверхности твердых тел.

В результате проделанной работы:

1. Обоснована возможность использования наносекундных источников излучения с длинами волн 193 нм (экцимерный ArF-лазер), 355 нм (твердотельный Nd:YAG-лазер), 510 нм, 578 нм (лазер на парах меди) в сочетании с методом прямого лазерного наноструктурирования для получения субмикро- и микроструктур с контролируемыми параметрами при облучении поверхности твердых тел.
2. Впервые создана экспериментальная установка, предназначенная для практической реализации и исследования метода прямого лазерного наноструктурирования поверхности твердых материалов, которая позволяет облучать одним или двумя синхронизированными пучками излучения импульсно-периодических ArF-, Nd:YAG- лазеров или лазера на парах меди с длительностью импульсов от 5 до 20 нс и плотностью энергии до 10 Дж/см², а также обладает возможностью регулировать время задержки между импульсами и число лазерных импульсов с разными длинами волн в заданных пределах как в неподвижном пятне, так и при его сканировании по поверхности.

3. Предложен и реализован метод увеличения длительности импульсов излучения электроразрядного эксимерного лазера с использованием накачки активной среды в режиме периодически затухающего напряжения на разрядном промежутке. Достоинство метода - возможность улучшения характеристик лазерного излучения без изменения основных параметров оптического резонатора и электрической системы накачки лазера.
4. Исследованы зависимости энергии и длительности лазерного излучения электроразрядного KrF-лазера с максимальной выходной энергией до 30 мДж от параметров напряжения накачки, состава и давления газовых смесей в разрядном промежутке. Данный метод позволяет увеличивать длительность лазерных импульсов с 15 нс до 45 нс, не приводя к существенным потерям выходной энергии лазера.
5. Экспериментально обнаружен эффект увеличения характерного периода, амплитуды и изменения формы образующихся нанорельефов с возрастанием лазерной интенсивности, что открывает возможность управления размерами нанорельефа. Продемонстрирована возможность прямого наноструктурирования поверхности германия, никеля, силицида платины, нитрида кремния, нержавеющей стали и титана при наносекундном многократном облучении ArF-лазером с длиной волны 193 нм.
6. С помощью АСМ микроскопии в зоне облучения поверхности твердых тел наносекундными лазерными импульсами с длинами волн 193 нм, 355 нм, 510 нм обнаружено образование микро- и субмикронных структур волнообразной и выпуклой форм, в том числе периодических структур с периодом порядка одного микрона и наноструктур пирамидальной формы, а также обнаружены наноструктуры необычной формы - в виде гексагональных ячеек на германии и в виде эллиптических нанократеров на нержавеющей стали.

При непосредственном участии автора была разработана конструкция и создана уникальная экспериментальная установка для субмикро- и наноструктурирования поверхности твердых материалов путем облучения импульсами лазерного излучения. Он обосновал и показал возможность

эффективного использования наносекундных лазеров при реализации метода прямого лазерного наноструктурирования.

Автором лично были проведены эксперименты по получению и исследованию субмикро- и наноструктур на поверхности твердых тел путем многократного облучения одним лазерным пучком при неподвижном пятне облучения и сканировании по поверхности, а также реализована возможность воздействия двумя импульсами различных лазеров, следующими с регулируемой задержкой. С помощью атомно-силовой микроскопии исследованы характерные особенности и условия возникновения субмикро- и нанорельефа на поверхности германия, никеля, силицида платины, нитрида кремния, нержавеющей стали и титана. Проведен научный анализ и дана интерпретация полученных экспериментальных данных.

Достоверность и обоснованность научных положений обеспечивается большим объемом накопленных экспериментальных данных, стабильностью параметров и воспроизводимостью результатов измерений. Все экспериментальные данные получены с использованием современных измерительных средств. Теоретическая оценка возможности прямого лазерного наноструктурирования выполнена на основе представлений о развитии лазерно-индуцированной неустойчивости рельефа поверхности с учетом процессов массопереноса способных приводить к изменению поверхностного рельефа в отсутствие плавления материала. В экспериментах по облучению поверхности образцов использовался метод прямого лазерного наноструктурирования, для реализации которого были выбраны эффективные лазерные источники, такие как эксимерный ArF-лазер (193 нм), твердотельный Nd:YAG-лазер (355 нм), лазер на парах меди (510 нм, 578 нм). В исследованиях по увеличению длительности импульса излучения эксимерного лазера использовался метод синхронной регистрации осциллограмм импульсов разрядного напряжения и излучения. В ходе экспериментов измерялась энергия выходного оптического излучения с помощью измерителя энергии NOVA II, одновременно регистрировались импульсы напряжения генератора накачки на разрядном

промежутке высоковольтным щупом Tektronix P6015A и импульсы лазерной генерации коаксиальным фотоэлементом ФЭК29 КПУ, сигналы от которых поступали в осциллограф LeCroy WaveSurfer 420. Исследование поверхностей облученных наносекундным лазерным излучением производилось с использованием атомно-силового микроскопа Alpha 300. Результаты были представлены в виде 3D и 2D изображений топографии поверхности.

Научная новизна данной диссертационной работы обусловлена тем, что автором впервые создана экспериментальная установка для реализации метода прямого лазерного наноструктурирования поверхности твердых тел с возможностью воздействовать двумя импульсами от разных лазеров с регулируемой задержкой между импульсами излучения, облучать неподвижным или сканирующим пучком импульсно-периодических ArF- лазера и лазера на парах меди, с полностью твердотельными высоковольтными генераторами накачки на основе IGBT транзисторов, а также Nd:YAG- лазером с длиной волны излучения 355 нм, воздействие которого ранее было мало изучено.

Впервые был предложен, реализован и исследован метод увеличения длительности импульсов излучения электроразрядного эксимерного лазера с накачкой активной среды в режиме периодически затухающего напряжения на разрядном промежутке.

Экспериментально продемонстрирована возможность формирования субмикро- и наноструктур различной формы на поверхности твердых тел, в частности впервые обнаружены наноструктуры в виде гексагональных ячеек на германии и эллиптических нанократеров на нержавеющей стали.

Результаты настоящей диссертационной работы были использованы при разработке научно-методического материала, который был включен в учебные программы высшего профессионального образования и НОЦ в рамках выполнения ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, ГК № 02.740.11.0411.

Основной материал диссертации достаточно полно изложен в 14 научных работах: 5 статей в научных рецензируемых журналах, 5 - из перечня ВАК, и 4

публикаций в сборниках трудов международных и всероссийских конференций. Список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах Института электрофизики и электроэнергетики РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала и ОАО "ОРКК"-«НИИ КП», а также на следующих международных конференциях: X International Conference Laser & Laser Information Technologies – ILLA<L 2009, Smolyan, Bulgaria, 2009; 7th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies - NN10, Halkidiki, Greece, 2010; 29th International Congress on Applications of Lasers and Electrooptics, Anaheim, USA, 2010; 8th International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies - NN11, Thessaloniki, Greece, 2011; 3rd International workshop on laser-matter interaction – WLM1 2012, Porquerolles, France, 2012; XIV Китайско-Российский Симпозиум "Новые материалы и технологии" г.Санья, Китай. 2017.

Работа соответствует паспорту специальности 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики», и содержит решение задачи разработки и создания экспериментальной установки для проведения экспериментальных исследований в области лазерных методов нано и микроструктурирования поверхности твердых тел. Она отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук.

Диссертация «Экспериментальная установка для прямого лазерного микро- и наноструктурирования рельефа поверхности твердых тел» Хасая Радмира Рюриковича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Заключение принято на ученом совете ИЭЭ РАН. Всего членов совета 24 чел., присутствовало на совете 19 чел. Результаты голосования: «за» - 19 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 3 от 20 марта 2019 г.