

Форма «Т». Титульный лист отчета (итогового отчета) о выполнении проекта

| | | | |
|---|--|---|---|
| Название проекта: Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в трехмерной геометрии | | Номер проекта: 14-19-01599 |  |
| | | Код типа проекта: ОНГ | |
| | | Отрасль знания: 09 | |
| Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: Анисимов Сергей Иванович | | Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: +7 9165194694, anisimov@itp.ac.ru | |
| Полное и краткое название организации, через которую осуществляется финансирование проекта: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН | | | |
| Объем средств, фактически полученных от РНФ в 2016 г.: 1800 тыс. руб. | | Год начала проекта: 2014 | Год окончания проекта: 2016 |
| | | Объем финансирования, запрошенный на 2016 год: 1800 тыс. руб. | |
| Перечень приложений к отчету | 1. Копии публикаций в соответствии с Формой 2о - 16 шт. на 31 стр. в 1 экз. <i>К печатному экземпляру отчета прикладываются только копии первой (с указанием авторов) страницы и страницы со ссылкой на поддержку от РНФ.</i> | | |
| Гарантирую, что при подготовке отчета не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в РНФ материалов и их использование РНФ для проведения экспертизы и для их обнародования. | | | |
| Подпись руководителя проекта <div style="text-align: right;"> _____ /С.И.Анисимов/ </div> | | Дата подачи отчета: 13 декабря 2016 г. | |
| Подпись руководителя организации Либо уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности. В случае подписания форм уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру отчета прилагается доверенность (копия доверенности, заверенная печатью организации). <div style="text-align: right;"> _____ / </div> | | | |
| Печать организации | | | |

Отчет о выполнении проекта
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»,
в 2016 году

1.1. Заявленный в проекте план работы на год

Формируется в соответствии с заявкой.

1). За 2015 г. созданы физические модели и численные коды для задачи о структурировании металлической пленки при воздействии на нее сфокусированного на дифракционном пределе ультракороткого лазерного импульса (см. пп. 1.3 и 1.6 отчета). Получено представление о режимах структурирования. Задача эта является важной для приложений и востребованной экспериментаторами. В 2016 г. будут выполнены совместные работы нашего коллектива с экспериментальными лабораториями в ИВТ, ФИАНе и ИАПУ ДВО РАН. Будут выяснены возможности оптимизации структур для наноплазмоники.

2). Будут продолжены исследования термодинамических и кинетических характеристик металлов с разной структурой электронных энергетических зон в неравновесном состоянии с отличающимися температурами электронов и ионов. Эти характеристики металла очень важны для применения в гидродинамическом коде, используемом для описания динамики абляции вещества под действием ультракоротких лазерных импульсов.

Кроме того, термодинамика и кинетика электронов определяет изменение оптических свойств металла в двухтемпературном (2Т) состоянии и тем самым оказывает влияние на отклик вещества мишени на воздействие пробных лазерных импульсов, используемых для оптической диагностики процесса абляции. Поэтому в плане работы на 2016 год предусматривается исследование влияния 2Т ситуации на оптические свойства металлов, в первую очередь благородных. Будет исследовано изменение коэффициента отражения тонких пленок этих металлов в процессе гидродинамического движения пленок при поверхностной плотности энергии лазерного излучения, меньшей порога абляции. При этом вещество мишени в течение всего процесса находится в твердой фазе.

Для больших значений интенсивности лазерного излучения, когда происходит плавление металла в области прогрева, будут вычислены кинетические коэффициенты рассматриваемых жидких металлов в 2Т состоянии.

Будут построены 2Т уравнения состояния (2Т-УрС) меди на основе данных 2Т квантового молекулярно-динамического расчёта, проведённого в 2015 году. Данное 2Т-УрС совместно с полученными в 2015 году из первых принципов кинетическими коэффициентами меди будет применено для 2Т гидродинамического моделирования лазерных мишеней.

3). 2Т гидродинамические (ГД) расчеты намного экономичнее молекулярно-динамических (МД) расчетов.

Поэтому в 2016 г. будет продолжена разработка одномерных в плоской и сферической геометрии и многомерных ГД кодов. При этом постоянно будет проводиться сравнения с результатами МД моделирования одинаковых задач. Сравнение будет производиться на задачах лазерной абляции, когда картина течения охватывает нагретый лазером слой, и на задаче о выходе ударной волны на тыльную сторону пленки или пластины.

4). Будут выполнены работы по моделированию лазерного воздействия, когда поглощающая мишень находится в контакте с прозрачным твердым или жидким веществом. Причем облучение идет через прозрачное вещество. В случае воды будет использован межатомный потенциал воды, разработанный в 2015 г.

5). Важной является задача о воздействии субнаносекундного оптического лазерного импульса на пленки толщиной несколько микрон. При этом диагностика осуществляется ультракоротким (длительность 10-100 фс) жестким (фотон 10-12 кэВ) импульсом рентгеновского лазера (РЛ) на свободных электронах. С помощью импульса РЛ и его рентгеновской дифракции на мишени осуществляют диагностику состояния вещества в твердом состоянии при давлениях порядка мегабара. Методика создана для исследования фазовых превращений при значительных сжатиях. Предстоит исследование ГД отклика пленки на оптическое лазерное воздействие. Это необходимо, чтобы расшифровать экспериментальный сигнал, содержащий как термодинамические, так и гидродинамические сведения.

1.2. Заявленные научные результаты на конец года

Формируется в соответствии с заявкой.

1). Физические модели и численные коды, созданные в 2015 г. будут применены для объяснения экспериментов по лазерному структурированию пленок металла (золото, серебро, возможно сплавы) остросфокусированным пучком. Будут выяснены возможности управления структурами путем варьирования лазерных параметров и параметров мишени.

2). С использованием полученных для твердой фазы кинетических коэффициентов и гидродинамического моделирования будет получено временное изменение коэффициента отражения диагностического луча оптического диапазона частот от тонких металлических пленок при поверхностной плотности энергии греющего импульса ниже порога абляции. Будет проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, позволяющее вести корректировку используемых термодинамических, кинетических и гидродинамических моделей.

Будут построены 2Т уравнения состояния (2Т-УрС) меди на основе данных 2Т квантового молекулярно-динамического расчёта, проведённого в 2015 году. Данное 2Т-УрС совместно с полученными в 2015 году из первых принципов кинетическими коэффициентами меди будет применено для 2Т гидродинамического моделирования лазерных мишеней.

3). В 2016 г. будет продолжена разработка одномерных в плоской и сферической геометрии и многомерных ГД кодов.

При этом постоянно будет проводиться сравнения с результатами МД моделирования по расчетам одинаковых задач.

4). Будут выполнены работы по моделированию лазерного воздействия, когда поглощающая мишень находится в контакте с прозрачным твердым или жидким веществом. Причем облучение идет через прозрачное вещество.

5). Будет проанализирована задача о воздействии субнаносекундного оптического лазерного импульса на пленки толщиной несколько микрон. При этом диагностика осуществляется ультракоротким (длительность 10-100 фс) жестким (фотон 10-12 кэВ) импульсом рентгеновского лазера (РЛ) на свободных электронах. С помощью импульса РЛ и его рентгеновской дифракции на мишени осуществляют диагностику состояния вещества в твердом состоянии

при давлениях порядка мегабара. Методика создана для исследования фазовых превращений при значительных сжатиях. Нам предстоит исследование ГД отклика пленки на оптическое лазерное воздействие. Это необходимо, чтобы отделить термодинамический отклик мишени от гидродинамических искажений.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы на год (фактически проделанная работа, до 10 стр.)

В полном соответствии с планом работ на год в ходе выполнения проекта в 2016 году была проделана следующая работа по пунктам заявленного плана:

1) Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование гидродинамических течений, которые возникают в веществе лазерной мишени при воздействии на нее острорасфокусированным ультракоротким лазерным импульсом. В экспериментах, проведенных при тесном сотрудничестве научных групп из ФИАНа, МИФИ, ИАПУ ДВО РАН, ДФУ, ВНИИА им. Н.Л. Духова, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН по облучению фемтосекундными лазерными импульсами пленки серебра, нанесенной на стеклянную подложку, впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом высокого разрешения был использован химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС). Определялись интенсивности линий характеристического рентгеновского L-излучения серебра и K-излучения кремния из подложки. Это позволило в экспериментах четко следить за распределением вещества при лазерной абляции серебряной пленки. Были проведены эксперименты при различной величине поверхностной плотности лазерного излучения (флюенса) с длительностью импульса 200 фс. Величина флюенса в экспериментах составляла 0.37 Дж/см², 0.53 Дж/см², 1.05 Дж/см². Получены изображения в сканирующем микроскопе структур, образующихся на поверхности пленки в процессе поглощения ультракороткого лазерного импульса, возникновения двухтемпературного состояния в веществе пленки, распространения тепла от поверхности вглубь пленки, плавления, гидродинамического движения вещества, его остывания и вторичной кристаллизации для всех трех значений флюенса. Полученные структуры сильно отличаются по форме, являя собой многообразие имеющих практическое значение наноструктурных видоизменений поверхности, в частности, для целей наноплазмоники [3].

Было проведено теоретическое исследование с молекулярно-динамическим моделированием проведенных экспериментов. В качестве материала для исследования был выбран другой благородный металл – золото. При молекулярно-динамическом моделировании важным является потенциал взаимодействия атомов, участвующих в моделировании. В ходе выполнения работ по проекту нами был разработан учитывающий многочастичные взаимодействия в металлах потенциал метода погруженного атома для золота. Параметры в нем находились из проведенных методом функционала плотности расчетов электронных состояний и энергии кристалла при одноосных деформациях, чтобы максимально учесть условия растяжения вещества мишени при лазерной абляции. Для описания всех стадий абляции, включающих поглощение излучения, нагрев пленки, ее плавление, движение расплава, его кристаллизацию требуется рассмотрение области мишени, содержащей не менее 10¹¹ атомов. Напрямую моделирование с таким количеством атомов пока находится за пределами возможностей молекулярно-динамического подхода. Однако эта трудность была нами преодолена с использованием двух важных решений. Движение пленки было разделено на два этапа. Первый – это движение пленки от момента поглощения лазерного импульса до отделения ее от подложки. На этом этапе существенно использована малость толщины пленки по сравнению с диаметром лазерного пятна на мишени. Эта малость позволила нам рассматривать каждую локальную точку на плоскости подложки в

одномерном приближении с помощью разработанного нами в ходе выполнения проекта двухтемпературного гидродинамического кода без использования более трудоемкой молекулярной динамики. В созданном гидродинамическом коде использованы полученные нами двухтемпературные термодинамические функции вещества металла с неравными температурами электронов и ионов и двухтемпературные кинетические коэффициенты, определяющие распространение тепла по веществу мишени. В результате решения системы гидродинамических уравнений определяются поля скорости и температуры как функции расстояния до центра пятна на момент отделения пленки от подложки. Далее эти поля используются в качестве начальных данных при молекулярно-динамическом моделировании полета, остывания и кристаллизации пленки в трехмерной геометрии. Чтобы промоделировать в молекулярно-динамическом подходе эту более позднюю стадию с используемым нами числом атомов, составляющим $(2 \div 200) \cdot 10^6$, на 3-5 порядков меньшим, чем в экспериментальной ситуации, мы воспользовались гидродинамическим подобием, позволяющим заменить систему с большим числом атомов системой с меньшим числом с равными безразмерными параметрами подобия. Число таких параметров в рассматриваемой задаче равно двум (капиллярный, задающий отношение скорости за счет капиллярных сил к скорости вещества в пленке и параметр охлаждения, равный отношению скорости фронта кристаллизации к скорости вещества). Это позволило провести молекулярно-динамическое моделирование на большом интервале времени от стадии отделения жидкой пленки от подложки до ее замерзания. Такое моделирование для пленки золота на стеклянной подложке для трех случаев, отличающихся величиной флюенса лазерного излучения, соответствующих условиям проведенных нами экспериментов на пленке серебра, показало полное соответствие структур, образующихся на поверхности пленки, наблюдавшихся в экспериментах и в результате компьютерного моделирования [9, 10].

Проведено молекулярно-динамическое моделирование движения атомов в пленке золота на диэлектрической подложке с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и решеткой методом Монте-Карло. Для этого каждый ион содержал один электрон, что обеспечивало электронейтральность рассматриваемой системы в любой момент времени. Соседние атомы обменивались электронами с частотой, которая находилась из известного по экспериментальным данным для жидкого золота коэффициента теплопроводности. Пары атомов, в которых осуществлялся обмен электронами выбирались случайно, ограничиваясь только положениями, находящимися внутри радиуса обрезания. Кроме того, был в том же методе Монте-Карло произведен учет обмена энергией между электронами и ионами. Для расчета динамики ионов использовался написанный нами межатомный потенциал с учетом многочастичных эффектов в приближении погруженного атома. Чтобы использовать при моделировании образования наноструктур на поверхности мишени достижимое в расчетах число атомов, которое на несколько порядков меньше присутствующего в физически важной области мишени, использовалось гидродинамическое подобие с двумя безразмерными параметрами, совпадающими для реальной физической области задачи и для модельной системы с существенно меньшим числом атомов. Получена картина формирования наноструктур на поверхности пленки золота посредством образования струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания оставшейся на мишени части в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части купола. С возрастанием поглощенного флюенса и увеличением начальной скорости движения, уменьшением капиллярного параметра подобия наблюдается разрушение жидкой оболочки над кратером в мишени вблизи зоны фазового перехода жидкость-твердое тело с образованием небольшого количества менее вытянутых струек. Их отвердевание вызывает появление структуры на поверхности мишени в виде нанокороны. Такие структуры, идентифицированные нами в молекулярно-динамическом моделировании, наблюдались и в натуральных экспериментах с пленками благородных металлов [6-

Численно и экспериментально рассмотрен эффект воздействия импульсов титан-сапфирового лазера фемтосекундного диапазона длительности на 60-100 нм пленки золота, помещенные на стеклянный субстрат. Энергия в импульсе бралась достаточной для абляции пленки. Впервые нами показано, что есть несколько различных режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от значения поглощенного флюенса (поверхностной плотности энергии лазерного излучения) и адгезионной прочности между пленкой и подложкой. А именно, при слабой адгезии существует пороговое значение флюенса, при котором начинается отслоение пленки (порог отслоения), а также порог начала абляции (разрушения пленки).

Выше нижнего порога (порога отслоения) вся пленка отслаивается от подложки. Выше более высокого порога абляции в пленке возникает разрыв вблизи ее средней части.

Внешняя половина пленки отделяется, а ее внутренняя половина остается на стеклянной подложке. Для пленок из золота и серебра высокой степени чистоты существуют оба указанных пороговых значения флюенса, т.к. такие пленки как раз слабо связаны со стеклом. Порог отслоения исчезает в случае сильной адгезии металла и подложки, в этом случае отслоение пленки в целом становится невозможным. Разрыв же пленки при превышении порога абляции при этом по-прежнему происходит, потому что величина порога абляции не зависит от сцепления металла с подложкой. Экспериментально большая величина адгезии получена нами при помещении между золотом и стеклом промежуточного тонкого слоя хрома. Скорость пленки после того, как она отделяется от подложки, мала в диапазоне флюенсов, находящемся между двумя пороговыми значениями, потому что акустический импеданс стекла мал по сравнению с импедансом пленки из золота. Поэтому в ходе процесса отслоения абсолютные значения (положительные или отрицательные) давлений в области контакта металла и подложки в несколько раз меньше, чем абсолютная величина давления в золотой пленке. Однако выше порога абляции скорость внешней части пленки становится в несколько раз больше, потому что эта скорость не зависит от величины акустического импеданса подложки. Это обстоятельство объясняет, почему на поверхности мишени после лазерного воздействия появляются такие трехмерные структуры, как наноструи над выпуклостями нанометровых размеров в случае слабого сцепления. Скорость пленки при этом должна быть не слишком большой. Это позволяет силам поверхностного натяжения и происходящей из-за отвода тепла кристаллизации расплавленной пленки остановить расширение выпуклости и отрыв и удаление верхней ее части [11,16].

Впервые было проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот, изготовленных воздействием одиночных ультракоротких импульсов лазерного излучения на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. Было найдено, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра полностью определяются размером нанопустот. Эти окрашенные геометрические резонансы были связаны нами с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод высокого порядка в нанопустотах. Это было со всей определенностью показано с помощью комплексного вычислительного подхода, который включает в себя двухтемпературную гидродинамику металла пленки, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование распределения материала внутри нанопустот и последующие электромагнитные расчеты, опирающиеся на полученные при таком моделировании формы нанопустот. Экспериментально обнаружено 6-кратное в среднем усиление сигнала фотolumинесценции от слоев комплексных солей алкилированного европия, внедренных в органическую матрицу, и молекул красителя родамина 6G (R6G) на пленке серебра. Кроме того, отдельные нанопустоты в серебре показывают пространственно усредненное усиление рамановского сигнала на R6G в $5 \cdot 10^4$ раз, а также зависящее от формы и размера усиление

фотолюминесценции, достигающее до 13 раз для конкретных наноструктур. Созданная малозатратная эффективная методика изготовления нанополостей в благородных металлах может быть использована для окрашивания металлов, высокопроизводительной и дешевой печати субстратов для плазмоники, Представленная в результате выполнения работ по проекту высокорентабельная лазерная печать на основе быстрого плавления, деформации и повторного затвердевания тонких пленок благородных металлов дает хорошо контролируемый способ создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости с очень гладкими стенками, Он представляется значительно более выгодным и эффективным по сравнению с другими способами их изготовления, например, на основе осаждения металла на нанотекстурированный шаблон [13].

2) Отличие температур электронов и ионов в металле, достигающее даже для лазерных импульсов умеренной интенсивности величин порядка нескольких эВ, приводит к необходимости использования двухтемпературных термодинамических функций и кинетических коэффициентов, входящих в систему гидродинамических уравнений. Эти двухтемпературные термодинамические функции и кинетические коэффициенты на ранней стадии взаимодействия с лазерным излучением определяют динамику разлета вещества мишени в процессе абляции. Исследование внутренних свойств металлов в двухтемпературных состояниях как важнейшая задача при изучении их абляции под действием ультракоротких лазерных импульсов проведено в ходе выполнения проекта в 2016 г. При этом для исследования динамики вещества в процессе лазерной абляции очень важными становятся кинетические коэффициенты, определяющие передачу тепла от электронной подсистемы к ионной, а также теплопроводность за счет электронов. Адекватный учет теплопроводности металла при различающихся температурах электронов и ионов как в твердой, так и жидкой фазах, является серьезной проблемой, важной для задач абляции металлов под действием лазерных импульсов короткой длительности. Температура электронов и профиль давления в объемных лазерных мишенях существенно зависят от распространения тепла вглубь мишени. В свою очередь, определяющий скорость распространения тепла коэффициент электронной теплопроводности сам зависит от электронной и ионной температур в двухтемпературной ситуации. Возникающие профили давления определяют в дальнейшем формирование ударных волн и волн разрежения в веществе мишени и всю картину лазерной абляции. В работах по проекту особое внимание было уделено благородным металлам (золоту, меди и серебру). В этих металлах при не слишком высоких ионных температурах малы частоты электрон-ионных столкновений. Поэтому в них наилучшим образом можно исследовать возрастающий с ростом электронной температуры вклад электрон-электронных столкновений в коэффициент теплопроводности металла. Для нахождения коэффициента теплопроводности металлов, а также удельного сопротивления в высокотемпературной области фазовой диаграммы в неравновесной двухтемпературной ситуации нами использованы два подхода. Во-первых, использовано приближение кинетического уравнения для кинетических коэффициентов, в котором учитываются как электрон-ионные, так и электрон-электронные столкновения вплоть до электронных температур порядка нескольких эВ. В исследуемых нами благородных металлах (золото, медь, серебро) для теплопроводности важны столкновения s- и p-электронов между собой, а также их столкновения с d-электронами. Проведены расчеты эффективных частот электрон-электронных столкновений (s-p- электронов проводимости между собой и электронов проводимости с d-электронами) для золота, меди и серебра путем нахождения из кинетических уравнений парциальных частот столкновений, зависящих от модуля волнового вектора электрона, и использовании их в интегралах по волновым векторам электронов в коэффициентах Онзагера для учета условия отсутствия электрического тока при теплопроводности. Получены аналитические аппроксимации эффективных частот межэлектронных столкновений как функций электронной температуры и плотности исследуемых

металлов. Из кривой холодного давления для золота, меди и серебра получена зависимость дебаевской температуры от плотности кристаллических фаз этих металлов, а с ней и зависимость частот электрон-фононных столкновений от плотности и ионной температуры, а с использованием известных экспериментальных значений электропроводности этих металлов в жидкой фазе получены частоты электрон-ионных столкновений в жидкой фазе. Соответственно в зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [2].

В другом подходе к проблеме нахождения кинетических коэффициентов конденсированных сред, в частности, металлов, в двухтемпературном состоянии, созданном под действием ультракоротких лазерных импульсов, мы опираемся на первопринципные расчеты электронной энергетической зонной структуры металлов методом функционала плотности и метод квантовой молекулярной динамики в сочетании с теорией Кубо-Гринвуда для расчета кинетических коэффициентов. В соответствии с этим в рамках работ по проекту проведены расчеты с использованием методов линеаризованных присоединенных плоских волн и псевдопотенциала, а также в более общей постановке и без использования приближения псевдопотенциала, для нахождения спектра электронных состояний меди в неравновесной двухтемпературной ситуации. Проведена проверка сходимости всех параметров наших первопринципных расчетов. Рассчитанная плотность электронных состояний с учетом высокой температуры электронов на двухтемпературной стадии воздействия ультракороткого лазерного излучения на металлы была использована для нахождения в меди важнейшего для задач двухтемпературной гидродинамики кинетического коэффициента, определяющего скорость электрон-ионного теплообмена. Этот коэффициент был рассчитан в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. При температурах ионов выше дебаевской (характерных для наших задач) в твердой фазе металла он не зависит от ионной температуры. Расчет электронного спектра из первых принципов в псевдопотенциальном приближении при различном выборе псевдопотенциала и в более трудоемком подходе, строго учитывающем все атомные электроны без использования приближения псевдопотенциала, вместе с квантовой молекулярной динамикой для ионных конфигураций и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от электронной температуры и плотности. Результаты основанной на кинетическом уравнении модели для теплопроводности меди хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [14].

Экспериментально на Cr:F лазере с длиной волны света греющего импульса 1240 нм, пробного импульса 620 нм и теоретически рассмотрена абляция пленки из золота на стеклянной подложке. В проведенных экспериментах с помощью интерферометра Майкельсона нами получены значения фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения при его взаимодействии с поверхностью пленки после облучения греющим импульсом лазера. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. В наших экспериментах обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени. Подробный анализ и интерпретация наблюдающихся в эксперименте изменений оптических параметров металла возможны только в сочетании с адекватной теоретической моделью и численными расчетами влияния воздействия ультракоротких лазерных импульсов на оптические свойства металлической мишени [2].

Для нахождения связи оптических параметров, определяемых из экспериментов, с внутренними параметрами металла в процессе изменения его состояния был проведен теоретический расчет

гидродинамического движения пленки и ее термодинамического состояния с помощью разработанного нами гидродинамического кода. Толщина пленки составляла в эксперименте 500 нм, что существенно превосходит глубину прогрева пленки за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена. Поэтому при проведенном нами теоретическом расчете пленка рассматривалась как массивный образец. Система уравнений созданного нами гидродинамического кода была использована для нахождения распределения электронной и ионной температур на ранних стадиях взаимодействия образца золота с лазерным излучением длительности 80 фс. В этом гидродинамическом коде использованы полученные нами аналитические аппроксимирующие выражения для коэффициента электронной теплопроводности в зависимости от электронной и ионной температур и плотности вещества. Проведено исследование влияния другого важного в двухтемпературной ситуации коэффициента - величины коэффициента электрон-ионного теплообмена α (недостаточно хорошо определяемого как экспериментально, так и теоретически) на параметры вещества пленки. Кроме распределения температур электронов и ионов в процессе гидродинамического моделирования находилось временное развитие профилей электронного и ионного давлений и плотности вещества мишени, а также проводилось исследование зависимости этих профилей от скорости обмена энергией между электронами и ионами. Найденное распределение плотности на ранней стадии гидродинамического движения вещества образца показывает наличие резкой границы конденсированного вещества даже при поверхностной плотности энергии лазерного излучения (флюенса), достаточной для плавления приграничной области образца. С учетом этого обстоятельства было проведено теоретическое рассмотрение оптических свойств золота в двухтемпературном состоянии с применением френелевского приближения на границе раздела сред для коэффициента отражения и фазового сдвига пробного лазерного излучения. Используемые в этом приближении значения комплексной диэлектрической проницаемости вещества мишени учитывают как электрон-ионную, так и электрон-электронную релаксацию в благородных металлах, а также межзонные электронные переходы в них. Полученное в результате теоретического и численного расчета временное изменение диэлектрической проницаемости золота, вычисленной с использованием в ней рассчитанных нами электронных времен релаксации в процессе изменения двухтемпературного состояния золота, обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Такие скачки в диэлектрической проницаемости обусловлены плавлением твердого вещества вблизи границы мишени на стадии, соответствующей моменту, когда теплообмен между электронами и ионами еще не закончен. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в неравновесном двухтемпературном состоянии металла [2].

3) Продолжена работа по совершенствованию гидродинамических кодов, используемых нами при исследовании различных случаев абляции конденсированных тел под действием ультракоротких лазерных импульсов. Они уже дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества на начальной стадии взаимодействия твердых мишеней с лазерным излучением и на заключительной стадии лазерной абляции при рекристаллизации полученного в результате лазерного воздействия расплава металла. Разработанные нами одномерные гидродинамические коды как в плоской геометрии, так и при цилиндрической и сферической симметрии, позволяют рассматривать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат. В качестве субстрата для металлических пленок в экспериментах, проводимых нами и другими научными группами, используется стекло. Соответственно твердый субстрат с характерными для стекол термодинамическими и кинетическими характеристиками используется в разработанных и применяемых нами для теоретического решения задач абляции и наноструктурирования металлов на подложке гидродинамических кодах. При этом характерной особенностью наших кодов является учет в них

двухтемпературного состояния вещества металлической лазерной мишени, возникающего в результате ультракороткого лазерного воздействия. Такое состояние возникает вследствие поглощения энергии лазерного излучения электронами металла и сравнительно медленной передачи энергии от электронов существенно более тяжелым ионам, особенно затрудненной у благородных металлов (медь и особенно серебро и золото) из-за большой массы их атомов. Именно исследованию благородных металлов, в том числе численно с помощью гидродинамических кодов, уделено наибольшее внимание в ходе осуществления работ по проекту в 2016 г. В двухтемпературном состоянии металлов в гидродинамические коды как для расчета объемных мишеней, так и для изучения пленок металлов, включены двухтемпературные термодинамические функции, такие как внутренняя энергия, электронная и ионная теплоемкости, электронное и ионное давление. Также в эти коды включены кинетические характеристики металла в двухтемпературном состоянии, определяющие перенос тепла в нем. Это коэффициент электрон-ионного теплообмена, определяющий скорость передачи тепла от электронов ионам и коэффициент электронной теплопроводности. Кроме того, в созданные нами гидродинамические коды включается критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, и таким образом в работах по проекту уже в гидродинамическом приближении было проведено исследование разрушения как массивных образцов, так и пленок. Тем не менее, кинетика образования новых фаз, а это в наших задачах кавитация, плавление, кристаллизация расплава, лучше исследуется при молекулярно-динамическом моделировании, широко представленном в работах по проекту в 2016 г. Но гидродинамическое моделирование является в наших работах существенно менее затратным по компьютерным ресурсам, чем молекулярно-динамическое моделирование, что является его несомненным преимуществом и позволяет широко использовать его в тех областях, где оно адекватно описывает круг происходящих явлений. При этом возможность решения одних и тех же задач в общей области применимости как гидродинамического приближения, так и молекулярно-динамического моделирования, служит одним из способов проверки адекватности подхода к расчетам и правильности результатов. В наших работах в 2016 г., в частности, гидродинамические расчеты использованы на начальной стадии лазерной абляции, при абляционных смещениях в направлении лазерного импульса, меньших поперечных размеров облученной области, при этом полученные в результате этих расчетов параметры вещества мишени, такие как температура, плотность, поле скоростей использовались далее как начальные параметры для более трудоемких молекулярно-динамических расчетов. [2,5, 9-12].

Проведено гидродинамическое моделирование ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами, которая продолжается несколько первых пикосекунд после пиковой интенсивности импульса лазера. Внимание было сосредоточено на отличии в поведении мишеней из золота различной толщины: сверхтонких пленок с толщиной порядка глубины скин-слоя или меньше, тонких пленок с толщиной, в 4-7 раз превышающей глубину скин-слоя и объемных мишеней (с толщиной, на порядок и более превышающих глубину скин-слоя). Показано, что это отличие определяется охлаждением первоначально нагретых в скин-слое электронов за счет электронной теплопроводности, передачей энергии от электронов ионам и, что важно, гидродинамикой разгрузки, вызванной повышенным электронным давлением. Когда толщина пленки оказывается больше глубины прогретого за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена слоя мишени, для золота составляющего 150-200 нм, термомеханическая абляция происходит из-за появления отрицательных напряжений и торможения расширяющегося вещества мишени за счет пространственной неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей ширины области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции, обусловленный быстрым падением полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления, первоначально сильно повышенного из-за поглощения электронами энергии лазерного импульса ультракороткой

длительности. Электронное давление быстро уменьшается за счет большой величины электронной теплопроводности; как показывают наши расчеты, коэффициент электронной теплопроводности при температурах электронов, близких к 1 эВ, существенно превосходит привычные значения, соответствующие нормальным условиям. При этом охлаждение за счет теплопроводности нуждается в стоке энергии, который мал в случае пленок небольшой толщины или совсем отсутствует в случае сверхтонких пленок. Поэтому в случае сверхтонких пленок обсуждаемый нами механизм разрушения пленки отсутствует [5].

4) Экспериментально исследовано возбуждение ударных волн лазерными импульсами и их распространение в железе. Эксперименты проведены в сотрудничестве с Фемтосекундным лазерным центром ОИВТ РАН. Пленка железа была нанесена на стекло, греющий лазерный импульс длительности 200 фс падал на металлическую пленку, пройдя слой стекла, в то время как зондирующий луч падал на пленку со стороны свободной поверхности. В одном из экспериментов толщина пленки составляла 250 нм, в другом - 540 нм при толщине стекла 150 мкм. С помощью интерферометра Майкельсона была проведена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. Такая техника сверхбыстрой интерферометрической диагностики была применена для измерения смещений поверхности мишени с пространственным разрешением 1-2 нм и ее скорости после численного дифференцирования. В выполненных экспериментах нами найдено, что для обеих толщин пленки имеет место двухволновая структура волны сжатия, приходящей на заднюю поверхность пленки. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй выходящей на заднюю поверхность волны указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [1].

Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа. Для проведения такого моделирования был сконструирован новый многочастичный потенциал модели погруженного атома для межатомных взаимодействий в железе. Параметры потенциала и его функциональная форма были специально подобраны, чтобы воспроизводить в железе фазовый переход из объемно-центрированной кубической (оцк) решетки в гексагональную плотноупакованную (гпу) решетку (переход оцк-гпу). Толщина пленки при молекулярно-динамическом моделировании была взята такой же, как и в экспериментальных условиях. При моделировании пленка располагалась ориентированной относительно направления падающего лазерного излучения в трех кристаллографических направлениях: [100],[110],[111]. Молекулярно-динамическое моделирование было использовано для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе, не обнаруженного нами в процессе эксперимента с фемтосекундным лазером с флюенсом падающего на стекло излучения 4 Дж/см². В результате моделирования найдено, что распространение ударной волны в направлении [100] наиболее благоприятно для фазового перехода из оцк фазы в гпу фазу. Проведенное моделирование показало, что в отличие от направления [100], ударные волны, распространяющиеся в направлениях [110] и [111], должны иметь существенно большую величину давления, чтобы иметь возможность вызвать такой структурный переход. В монокристаллической пленке, ориентированной в направлении [100], переход легко происходит уже в упругой ударной волне с давлением 20 ГПа. В то же время при ориентировке пленки в направлениях [110] и [111] фазовый переход оцк-гпу наблюдается на первых 100-200 нм от переднего по отношению к лазерному излучению края пленки, где давление в ослабевающей по мере распространения вглубь пленки ударной волне превышает 30 ГПа. Подобно тому, что наблюдалось в эксперименте, в молекулярно-динамическом моделировании мы также не обнаружили структурного перехода в ослабленной ударной волне на задней по отношению к падающему лазерному излучению стороне пленки после прохождения ударной волной значительной в наших условиях толщины пленки 540

нм. Структурный переход оцк-гну имеет место на ранней стадии распространения волны, когда ударное давление достаточно для того, чтобы его вызвать. С помощью компьютерного моделирования проведено исследование обратного фазового перехода гну-оцк и найдено, что такой переход инициируется в разгрузочной части ударной волны при давлении 13 ГПа и быстро завершается, когда давление падает до 8 ГПа [4].

5) В тесном сотрудничестве с группой ученых из ведущих научных центров Японии, США, Европы, среди которых Osaka University, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Synchrotron X-ray Station at SPring-8, RIKEN Spring-8 Center, Sayo, Hirishima University (Япония), University of Nevada (США), Universite Pierre et Marie Curie, Ecole Polytechnique (Франция) представлен эффективный косвенный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны, что позволяет вести мониторинг ее воспроизводимости при каждом лазерном выстреле. Этот метод основан на измерении рентгеновского излучения из абляционной плазмы фокусирующим спектрометром высокого разрешения. Оптический греющий лазер с энергией 1.0 Дж и длительностью импульса 660 пс был использован для облучения пленок твердых материалов различной толщины, содержащих кислород, алюминий, железо и тантал. Высокая чувствительность и разрешающая способность рентгеновского спектрометра позволяют получать спектры при каждом лазерном выстреле и контролировать флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%, что соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% в pump-probe экспериментах физики высоких плотностей энергии. При нано- субнаносекундной длительности лазерного импульса с относительно низкими интенсивностями излучения и для не слишком тяжелых химических элементов в составе мишени, у которых для стабильных изотопов отношение заряда ядер к массовому числу ~ 0.5 , электронная температура T оказывается связанной с интенсивностью лазерного излучения I соотношением $T \sim I^{2/3}$, что дает оценку интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать непрямую оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации дают нам возможность от выстрела к выстрелу следить за воспроизводимостью силы ударных волн с высокой точностью [15].

Все планируемые на год работы выполнены полностью:

да

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году (до 5 стр.)

1. В отчетном году достигнуты важные результаты при исследовании процессов, происходящих при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на тонкую пленку металла, напыленного на подложку. При выполнении большого круга связанных с этим работ численно и экспериментально рассмотрен эффект воздействия импульсов титан-сапфирового лазера фемтосекундного диапазона длительности на 60-100 нм пленки золота, помещенные на стеклянный субстрат при флюенсе (поверхностной плотности энергии на мишени, превышающей порог абляции). В результате нами впервые обнаружено несколько различных режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от значения поглощенного флюенса и адгезионной прочности между пленкой и подложкой. Показано, что при слабой адгезии существует пороговое значение флюенса, при котором начинается отслоение пленки от подложки (порог отслоения), а также порог для начала разрушения пленки (порог абляции). Порог абляции выше порога отслоения. Выше порога отслоения пленка целиком отслаивается от подложки. Выше более высокого порога абляции в пленке возникает разрыв вблизи ее средней части, при этом внешняя половина пленки отделяется, а внутренняя остается на стеклянной подложке. Такая картина характерна для

пленок из чистых золота и серебра на подложке из-за слабой адгезии. Обнаружено, что порог отслоения исчезает в случае сильной адгезии, в этом случае расслоение в целом становится невозможным. Разрыв пленки при превышении порога абляции остается. Экспериментально большая величина адгезии получена нами при помещении между золотом и стеклом промежуточного тонкого слоя хрома. [11,16].

2. Получены важные результаты в ходе выполнения экспериментальных исследований гидродинамических течений, которые возникают в веществе лазерной мишени при воздействии на нее остросфокусированным ультракоротким лазерным импульсом, проведенных при тесном сотрудничестве научных групп из ФИАНа, МИФИ, ИАГУ ДВО РАН, ДФУ, ВНИИА им. Н.Л. Духова, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН. В ходе экспериментов по облучению фемтосекундными лазерными импульсами пленок серебра, нанесенных на стеклянную подложку, впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом высокого разрешения был применен химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС) с измерением интенсивности линий характеристического рентгеновского L-излучения серебра и K-излучения кремния из подложки. Получены изображения в сканирующем микроскопе структур, образующихся на поверхности пленки. Многообразие форм полученных наноструктур имеет большое практическое значение, в частности, для целей наноплазмоники [3].

3. Важные результаты получены при проведении теоретического исследования с молекулярно-динамическим моделированием проведенных нами экспериментов по изучению гидродинамических течений, возникающих в веществе мишени при действии на нее остросфокусированным ультракоротким лазерным импульсом. В ходе выполнения работ по проекту был разработан оригинальный учитывающий многочастичные взаимодействия в металлах в условиях одноосной деформации потенциал метода погруженного атома для золота. Решена проблема нехватки вычислительных ресурсов для описания всех стадий абляции, включающих поглощение излучения, нагрев пленки, ее плавление, движение расплава, его кристаллизацию и требующих напрямую рассмотрение области мишени, содержащей не менее 10^{11} атомов, что находится сейчас за пределами возможностей молекулярно-динамического подхода. Проблема решена сочетанием молекулярной динамики с менее затратным гидродинамическим подходом на ранней стадии и применением подобия в моделировании с двумя параметрами подобия. И это является важным достигнутым в ходе работ по проекту результатом, позволившим сократить число атомов в моделировании до достижимых $(2 \div 200) \cdot 10^6$ [9,10].

4. Получена картина образования наноструктур на пленке золота на диэлектрической подложке проведением молекулярно-динамического моделирования движения атомов с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и решеткой методом Монте-Карло. Чтобы использовать при моделировании образования наноструктур на поверхности мишени достижимое в расчетах число атомов, которое на несколько порядков меньше присутствующего в физически важной области мишени, использовалось гидродинамическое подобие с двумя безразмерными параметрами, совпадающими для реальной физической области задачи и для модельной системы с существенно меньшим числом атомов. Это позволило наблюдать формирование наноструктур на поверхности пленки золота в виде струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания оставшейся на мишени части в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части купола или, с возрастанием поглощенного флюенса, структуры в виде нанокороны [6-8].

5. Достигнуты важные результаты в области исследования электромагнитного излучения в наноструктурах. Впервые проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот, изготовленных воздействием одиночных ультракоротких импульсов лазерного излучения на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. Найдено, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра определяются размером нанопустот. Эти окрашенные геометрические резонансы были связаны нами с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод высокого порядка в нанопустотах, что показано с помощью комплексного вычислительного подхода, включающего в себя двухтемпературную гидродинамику металла пленки, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование распределения материала внутри нанопустот и электромагнитные расчеты, опирающиеся на полученные при таком моделировании формы нанопустот. Экспериментально обнаружено усиление сигнала фотolumинесценции и рамановского сигнала молекул красителя в пленке серебра. Представлен, таким образом, эффективный высокорентабельный способ лазерной печати на основе быстрого плавления, деформации и повторного затвердевания тонких пленок благородных металлов и создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости [13].

6. Важные результаты достигнуты в исследовании внутренних свойств металлов в имеющей большое значение при взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с веществом в двухтемпературной области. В приближении кинетического уравнения получен коэффициент теплопроводности металлов в неравновесной двухтемпературной ситуации, в котором учитываются как электрон-ионные, так и электрон-электронные столкновения вплоть до электронных температур порядка нескольких эВ. Получены эффективные частоты электрон-электронных столкновений (s-p- электронов проводимости между собой и электронов проводимости с d-электронами) для золота, меди и серебра и аналитические аппроксимации эффективных частот межэлектронных столкновений как функций электронной температуры и плотности исследуемых металлов. Получена зависимость частот электрон-фононных столкновений от плотности и ионной температуры. В зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [2].

7. Получены кинетические коэффициенты меди в двухтемпературном состоянии, созданном под действием ультракоротких лазерных импульсов, проведением первопринципных расчетов методом функционала плотности для электронной энергетической зонной структуры и методом квантовой молекулярной динамики в сочетании с теорией Кубо-Гринвуда. Рассчитанная плотность электронных состояний на двухтемпературной стадии была использована для нахождения в меди коэффициента электрон-ионного теплообмена в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. Расчет электронного спектра из первых принципов в псевдопотенциальном приближении при различном выборе псевдопотенциала и в более трудоемком подходе, учитывающем все атомные электроны без использования приближения псевдопотенциала, вместе с квантовой молекулярной динамикой для учета движения ионов и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от температуры электронов и плотности. Результаты основанной на кинетическом уравнении модели для теплопроводности меди хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [14].

8. Выполнены экспериментальные исследования абляции пленки из золота на стеклянной подложке под действием фемтосекундного излучения Cr:F лазера. В экспериментах, проведенных

совместно с сотрудниками ОИВТ РАН, с помощью интерферометра Майкельсона получены значения фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения на пленке. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. Обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени.

9. Проведен теоретический расчет гидродинамического движения пленки и ее термодинамического состояния с помощью разработанного нами гидродинамического кода. Система уравнений созданного нами гидродинамического кода была использована для нахождения распределения электронной и ионной температур и плотности на ранних стадиях взаимодействия образца золота с лазерным излучением длительности 80 фс. С учетом этих параметров вещества мишени проведено теоретическое рассмотрение оптических свойств золота в двухтемпературном состоянии с применением френелевского приближения на границе раздела сред для коэффициента отражения и фазового сдвига пробного лазерного излучения. Полученное в результате теоретического и численного расчета временное изменение диэлектрической проницаемости золота, вычисленной с использованием в ней рассчитанных нами электронных времен релаксации в процессе изменения двухтемпературного состояния золота, обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Такие скачки в диэлектрической проницаемости обусловлены плавлением твердого вещества вблизи границы мишени на стадии, соответствующей моменту, когда теплообмен между электронами и ионами еще не закончен. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в неравновесном двухтемпературном состоянии металла [2].

10. Важным достигнутым результатом в ходе работ по проекту в 2016 году явилось создание и совершенствование уже созданных нами гидродинамических кодов, используемых при исследовании различных случаев абляции конденсированных тел под действием ультракоротких лазерных импульсов. Они дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества на начальной стадии взаимодействия твердых мишеней с лазерным излучением и на заключительной стадии лазерной абляции при рекристаллизации полученного в результате лазерного воздействия расплава металла. Разработанные нами одномерные гидродинамические программы позволяют рассматривать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат. Характерной особенностью наших кодов является учет в них двухтемпературного состояния вещества металлической лазерной мишени, возникающего в результате ультракороткого лазерного воздействия. Кроме того, в созданные нами гидродинамические коды включается критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, что позволило в работах по проекту уже в гидродинамическом приближении провести исследование разрушения как массивных образцов, так и пленок [2,5, 9-12].

11. Выявлен новый механизм разрушения пленок металлов при проведении гидродинамического моделирование ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами, которая продолжается несколько первых пикосекунд после пиковой интенсивности импульса лазера. Внимание было сосредоточено на отличии в поведении мишеней из золота различной толщины: сверхтонких пленок с толщиной порядка глубины скин-слоя или меньше, тонких пленок с толщиной, в 4-7 раз превышающей глубину скин-слоя и объемных мишеней (с толщиной, на порядок и более превышающих глубину скин-слоя). Когда толщина пленки оказывается больше глубины прогретого за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена слоя мишени, для золота составляющего 150-200 нм, термомеханическая абляция происходит из-за

появления отрицательных напряжений и торможения расширяющегося вещества мишени за счет пространственной неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей ширины области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции, обусловленный быстрым падением полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления, первоначально сильно повышенного из-за поглощения электронами энергии лазерного импульса ультракороткой длительности. Электронное давление быстро уменьшается за счет большой величины электронной теплопроводности. В случае сверхтонких пленок выявленный нами механизм разрушения пленки отсутствует [5].

12. Достигнуты важные результаты при экспериментальном исследовании возбуждения ударных волн лазерными импульсами и их распространение в железе. Эксперименты проведены в сотрудничестве с Фемтосекундным лазерным центром ОИВТ РАН. Пленка железа была нанесена на стекло, греющий лазерный импульс длительности 200 фс падал на металлическую пленку, пройдя слой стекла, в то время как зондирующий луч падал на пленку со стороны свободной поверхности. С помощью интерферометра Майкельсона была проведена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. В выполненных экспериментах нами найдено, что для обеих толщин пленки имеет место двухволновая структура волны сжатия, приходящей на заднюю поверхность пленки. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй выходящей на заднюю поверхность волны указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [1].

13. Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа и получены важные результаты. Параметры межчастичного потенциала при моделировании и его функциональная форма были специально подобраны, чтобы воспроизводить в железе фазовый переход из объемно-центрированной кубической (оцк) решетки в гексагональную плотноупакованную (гпу) решетку (переход оцк-гпу). Толщина пленки при молекулярно-динамическом моделировании была взята такой же, как и в экспериментальных условиях. Молекулярно-динамическое моделирование было использовано для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе. В результате моделирования найдено, что распространение ударной волны в направлении [100] наиболее благоприятно для фазового перехода из оцк фазы в гпу фазу. Проведенное моделирование показало, что в отличие от направления [100], ударные волны, распространяющиеся в направлениях [110] и [111], должны иметь существенно большую величину давления, чтобы иметь возможность вызвать такой структурный переход. Структурный переход оцк-гпу имеет место на ранней стадии распространения волны, когда ударное давление достаточно для того, чтобы его вызвать. [4].

14. Представлен новый эффективный косвенный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны позволяющий вести мониторинг ее воспроизводимости при каждом лазерном выстреле. Метод основан на измерении рентгеновского излучения из абляционной плазмы фокусирующим спектрометром высокого разрешения. Проведены эксперименты с облучением оптическим греющим лазером с энергией 1.0 Дж и длительностью импульса 660 пс пленок твердых материалов различной толщины, содержащих кислород, алюминий, железо и тантал. Высокая чувствительность и разрешающая способность рентгеновского спектрометра позволили получать спектры при каждом лазерном выстреле и контролировать флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%, что соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% и интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать непрямую оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации дают нам возможность от выстрела к выстрелу следить за воспроизводимостью силы ударных волн с

высокой точностью [15].

Все запланированные в отчетном году научные результаты достигнуты:

да

1.5. Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РФФ

на русском языке (до 3 страниц текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту)

1. В отчетном году выполнены работы и получены важные результаты при исследовании процессов, происходящих при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на тонкие пленки металлов на стеклянной подложке. Численно и экспериментально рассмотрено действие фемтосекундных импульсов на пленки золота в зависимости от флюенса (поверхностной плотности энергии на мишени). Впервые обнаружено несколько режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от поглощенного флюенса и величины адгезии между пленкой и подложкой. Показано, что при слабой адгезии существует пороговое значение флюенса для начала отслоения пленки от подложки (порог отслоения), а также более высокий порог начала разрушения пленки (порог абляции). Выше порога отслоения пленка целиком отходит от подложки. Выше более высокого порога абляции пленка разрывается вблизи ее средней части. Это характерно для пленок из чистых золота и серебра на подложке из-за слабой адгезии. Порог отслоения исчезает в случае сильной адгезии, в этом случае расслоение в целом становится невозможным. [11,16].

2. Проведено экспериментальное изучение гидродинамических течений, возникающих в мишени при воздействии на нее остророфокусированным ультракоротким лазерным импульсом и получены новые важные результаты. В экспериментах с пленками серебра на стеклянной подложке впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом был применен химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС) для L-линий характеристического рентгеновского излучения серебра и K-линий кремния из подложки. В сканирующем микроскопе получены изображения структур на поверхности пленки, имеющих большое практическое значение, в частности, для целей наноплазмоники [3].

3. Путем сочетания гидродинамического подхода на ранней стадии и применением подобия в моделировании решена проблема нехватки вычислительных ресурсов при прямом молекулярно-динамическом моделировании проведенных нами экспериментов по изучению гидродинамических течений, возникающих в мишени при действии на нее остророфокусированных ультракоротких лазерных импульсов. Проведено молекулярно-динамическое моделирование разлета вещества пленки из золота на стеклянной подложке и образования наноструктур, включающее нагрев пленки, ее плавление, движение расплава, его кристаллизацию, требующее при расчете напрямую рассмотрение области мишени, содержащей не менее 10^{11} атомов, и выполненное в наших расчетах на несколько порядков меньшим ($(2 \div 200) \cdot 10^6$) числом атомов [9,10].

4. Проведено гидродинамическое моделирование на начальной стадии абляции пленки золота на подложке и молекулярно-динамическое моделирование движения атомов с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и решеткой методом Монте-Карло. Чтобы использовать при моделировании образования наноструктур на поверхности мишени достижимое в расчетах число атомов, которое на несколько порядков меньше присутствующего в физически важной области мишени,

использовалось гидродинамическое подобие. Это позволило наблюдать формирование наноструктур на поверхности пленки золота в виде струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания оставшейся на мишени части в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части или структуры в виде нанокороны [6-8].

5. Проведены исследования электромагнитного излучения в наноструктурах и получены новые важные результаты. Впервые проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот, полученных воздействием ультракоротких импульсов лазерного излучения на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. Найдено, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра определяются размером нанопустот и связаны с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод в нанопустотах, что показано нами с помощью вычислительного подхода, включающего двухтемпературную гидродинамику металла пленки, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование вещества внутри нанопустот и опирающиеся на это моделирование электромагнитные расчеты. Представлен эффективный высокорентабельный способ лазерной печати путем создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости [13].

6. Проведена большая работа и получены важные результаты в исследовании внутренних свойств металлов в неравновесной двухтемпературной области. Получены эффективные частоты электрон-электронных столкновений (s-p- электронов проводимости между собой и электронов проводимости с d-электронами) для золота, меди и серебра, их аналитические аппроксимации как функции электронной температуры и плотности исследуемых металлов. Получена зависимость частот электрон-фононных столкновений от плотности и ионной температуры. В зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [2].

7. Получены кинетические коэффициенты меди в двухтемпературном состоянии проведением расчетов методом функционала плотности для электронной энергетической зонной структуры и методом квантовой молекулярной динамики в сочетании с теорией Кубо-Гринвуда для расчета кинетических коэффициентов. Рассчитанная плотность электронных состояний была использована для нахождения в меди коэффициента электрон-ионного теплообмена в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. Расчет электронного спектра из первых принципов вместе с квантовой молекулярной динамикой для учета движения ионов и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от температуры электронов и плотности. Результаты, основанные на использовании кинетического уравнения, хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [14].

8. Проведены экспериментальные исследования абляции пленки из золота на стеклянной подложке под действием фемтосекундных импульсов Cr:F лазера. В экспериментах, проведенных совместно с сотрудниками ОИВТ РАН, с помощью интерферометра Майкельсона получены значения фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения на пленке. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. Обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени [2].

9. Проведен теоретический расчет гидродинамического движения пленки золота и ее термодинамического состояния с помощью разработанного нами гидродинамического кода. Проведено теоретическое рассмотрение оптических констант золота в двухтемпературном состоянии. Используемые значения комплексной диэлектрической проницаемости при изменяющемся состоянии вещества мишени учитывают как электрон-ионную, так и электрон-

электронную релаксацию в благородных металлах, а также межзонные электронные переходы в них. Полученное в результате теоретического расчета временное изменение диэлектрической проницаемости золота обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в неравновесном двухтемпературном состоянии металла [2].

10. Проведена большая работа по созданию и совершенствованию уже созданных нами гидродинамических кодов, используемых при исследовании различных случаев абляции конденсированных тел под действием ультракоротких лазерных импульсов. Они дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества, позволяют исследовать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат и учитывают двухтемпературное состояние металлической лазерной мишени. Кроме того, в созданные нами гидродинамические коды включается критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, что позволило в работах по проекту уже в гидродинамическом приближении провести исследование разрушения как массивных образцов, так и пленок [2,5, 9-12].

11. Выявлен новый механизм разрушения пленок металлов при гидродинамическом моделировании ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами пленок из золота. При толщине пленки, большей глубины прогретого электронно теплопроводностью и электрон-ионным теплообменом слоя мишени, термомеханическая абляция происходит из-за появления отрицательных напряжений и торможения расширяющегося вещества мишени за счет пространственной неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции, обусловленный быстрым падением полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления из-за электронной теплопроводности. [5].

12. Проведено экспериментальное исследование возбуждения ударных волн лазерными импульсами и их распространение в железной пленке на подложке. С помощью интерферометра Майкельсона выполнена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. Найдено, что имеет место двухволновая структура волны сжатия, приходящей на заднюю поверхность пленки. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [1].

13. Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа и получены важные результаты. Молекулярно-динамическое моделирование было использовано для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе. Найдено, что распространение ударной волны в кристаллографическом направлении [100] наиболее благоприятно для фазового перехода из оцк в ппу фазу. В отличие от направления [100], ударные волны в направлениях [110] и [111] должны иметь существенно большую величину давления для такого структурного перехода [4].

14. Представлен новый эффективный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны позволяющий вести мониторинг ее воспроизводимости при каждом лазерном выстреле, основанный на измерении рентгеновского излучения из абляционной плазмы фокусирующим спектрометром высокого разрешения, позволяющим получать спектры при каждом лазерном выстреле и контролировать флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%, что соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% и интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации - следить за воспроизводимостью силы ударных волн [15].

1. In the reporting year works in the study of the processes taking place when ultrashort laser pulses act onto the thin metal films on a glass substrate were made and important results were obtained. Numerically and experimentally the action of femtosecond pulses onto the gold films in dependence on of fluence (surface energy density on the target surface) was examined. Several modes of ablation and formation of three-dimensional structures, depending on the absorbed fluence and the value of adhesion between the film and the substrate were first observed. It has been shown that at the weak adhesion there is a threshold fluence value for the beginning of the film delamination from the substrate (delamination threshold), as well as a higher threshold of the beginning of the film destruction (ablation threshold). Above the delamination threshold, the entire film departs from the substrate. Above a more higher ablation threshold the film breaks down near a half of its thickness. This is typical of films of pure gold and silver on the substrate due to poor adhesion. Delamination threshold disappears in the case of strong adhesion, in this case the peeling as a whole becomes impossible. [11.16].

An experimental study of hydrodynamic flows in the target under the action of sharply focused ultrashort laser pulse is carried out and new important results are obtained. In the experiments with the silver films on a glass first for imaging of results of laser action onto the target a chemical analysis of a laser-modified films by the characteristic energy dispersive X-ray fluorescence microspectroscopy (EDRS) for the L-lines of characteristic X-ray irradiation of silver and K-lines of silicon from the substrate was applied along with a scanning electron microscope. Images of structures on the film surface of great practical importance, in particular for nanoplasmonics, are obtained in the scanning microscope [14].

3. By combining the hydrodynamic approach at an early stage and the application of the scaling in the molecular-dynamics simulation the problem of lack of computing resources in direct molecular dynamic simulations of our experiments on study the hydrodynamic flows arising in the target under the action of sharply focused ultrashort laser pulses was solved. A molecular dynamics simulation of the expansion of the gold film on a glass substrate and the formation of nanostructures, including heating of the film, its melting, the movement of the melt and its crystallization, which requires in the direct calculation consideration of the target area, containing not less than 10^{11} atoms, was performed in our calculations with the use of several orders of magnitude smaller $((2 \div 200) \cdot 10^6)$ atoms [9,10].

4. A hydrodynamic calculation of the initial stage of the ablation of gold film on a substrate and molecular dynamics simulation of the motion of atoms with the addition of electronic components to account for electron heat conduction and energy exchange between electrons and ions by the Monte Carlo method. To be used when modeling the formation of nanostructures on the surface of the target achievable in the calculation number of atoms, which is several orders of magnitude less than in physically important area of the target, it was used scaling approach. This made it possible to observe the formation of nanostructures on the surface of the gold film in the form of jets on the surface of the liquid dome, their destruction on the drops in the upper part due to the surface tension and freezing remaining on the target portion as a solid dome with very elongated edge at the top part or structure of nanocrown form [6-8].

5. Electromagnetic radiation in nanostructures is investigated and new important results are obtained. For the first time the resonance scattering of light by individual nanovoids received by the action of ultrashort laser pulses onto the noble metal film on a glass substrate was studied using a confocal microspectroscopy dark field. It is found that the spectral positions of the resonance scattering peaks in the visible region of the spectrum are determined by the size of nanovoids and related to excitation and interference of the transverse plasmon modes in nanovoids, which is shown by the use of a computational approach with a two-temperature hydrodynamics of the metal film, molecular dynamics

and Monte Carlo simulation of substance inside nanovoids and electromagnetic calculations build on this simulations. An effective highly profitable way of laser printing by creating separate nanovoids and their ordered arrays of large capacity is supposed [20].

6. A great deal of work was made and important results obtained in the study of the intrinsic properties of metals in non-equilibrium two-temperature state. Effective frequencies of electron-electron collisions (s-p- conduction electrons with each other and the conduction electrons with the d-electrons) for gold, copper and silver, their analytical approximations as a functions of the electron temperature and density of the investigated metals ere received. The dependence of the frequency of the electron-phonon collisions on the density and ion temperature is obtained. Depending on the electron temperature, ion temperature and density in gold, copper and silver the coefficient of electronic thermal conductivity in the kinetic energy approximation has been calculated. Convenient to use the expression for the electronic thermal conductivity in the solid and liquid phases of these metals are obtained [2].

7. The kinetic coefficients of copper in the two-temperature state are received by the calculations with the use of the density functional method for the electronic energy band structure and the method of quantum molecular dynamics coupled with Kubo-Greenwood theory to calculate the kinetic coefficients. The calculated electron density of states was used to obtain the coupling parameter of the electron-ion energy transfer in copper, depending on the electron temperature and density of matter. The calculation of the electron spectrum from first principles with quantum molecular dynamics to account for the motion of the ions and the theory of Kubo-Greenwood was used to find electron thermal conductivity in copper as a function of the electron temperature and density. The results, based on the use of the kinetic equation, are in good agreement with those obtained using the Kubo-Greenwood theory [14].

8. Experimental studies of ablation of gold film on a glass substrate under the action of femtosecond Cr: F laser were done. In experiments carried out in collaboration with the scientists of JIHT RAS, with the use of Michelson interferometer, the values of the phase shift and the reflection coefficient of the probe laser beam on the film were received. With these two parameters recovery of the resulting from the experimental data complex permittivity and the complex refractive index was carried out. Jumps in a temporal change of the permittivity are found [2].

9. The theoretical calculation of the hydrodynamic motion of the gold film and its thermodynamic state was made by the hydrodynamic code developed by us. A theoretical consideration of the optical constants of gold in the two-temperature state is carried out. Useful values of complex permittivity at the changing state of the target material take into account the electron-ion and electron-electron relaxation in noble metals, as well as interband electronic transitions in them. The resulting theoretical calculation of the temporary change in permittivity of gold finds non-monotonic behavior and jumps similar to those obtained in the experimental work. Thus, a developed model lets you track phase transitions in two-temperature non-equilibrium state of the metal [2].

10. A great deal of work on the creation and improvement of already developed hydrodynamic codes used in the investigation of various cases of ablation of condensed targets under the action of ultrashort laser pulses was done. These hydrodynamic codes enable consideration as targets of both liquids and solids, with taking into account the shear stress in the solid phase of material, allow to study both the bulk targets and thin films either in the free state, or placed on the substrate and allow two-temperature state of the metal laser target. In addition, hydrodynamic codes include vapor formation criterion, fluid cavitation as it is stretched during laser ablation, which made it possible to investigate in the framework of the project the breaking of bulk targets as well as films already in the hydrodynamic approximation [2,5, 9 -12].

11. A new mechanism for the destruction of metal films is revealed at the hydrodynamic calculation of the

early stage of the ablation of gold films under the action of femtosecond laser pulses. When the film thickness is greater than the depth of the heated by the electronic thermal conductivity and electron-ion heat transfer target layer, thermomechanical ablation is due to the occurrence of the negative stress and deceleration of the expanding target material due to the spatial inhomogeneity of the heated range. When the film thickness is less than the depth of heated domain in a bulk sample, there is an additional mechanism for the ablation caused by a rapid drop in total pressure during the first 2-3 ps due to the strong reduction of electron pressure because of the electronic conduction. [5].

12. An experimental investigation of the excitation of shock waves by the laser pulses and their propagation in the iron film on the substrate was made. With the help of a Michelson interferometer diagnostics of movement of free rear surface of the film is carried out. We found that there is a two-wave structure of the compression wave, coming onto the back surface of the film. The measured high velocity of the first wave corresponds to a metastable elastic shock wave, while the lower speed of the second wave points to the next following plastic shock wave [1].

13. Along with the experiments done in the framework of project, molecular dynamics simulation of laser-induced shock wave in the free film of iron was carried out and important results obtained. Molecular dynamics simulations were used to determine the conditions of observation of the polymorphic transition in iron. We found that the propagation of a shock wave in the crystallographic direction [100] the most favorable for the phase transition from bcc to hcp phase. In contrast to the [100] direction, the shock waves along the [110] and [111] should have a significantly greater amount of pressure for such a structural transition [4].

14. A new effective method of power of shock wave generated by the laser in a target allowing to monitor its reproducibility shot-to-shot, based on measurement of X-ray emission from the ablation plasma by the focusing high-resolution spectrometer. It allows to obtain spectra for each laser shot and control the fluctuations of the spectral intensity with the accuracy up to 2%, which corresponds to the accuracy of the determining the plasma electron temperature to be 5% -7%, and the intensity of the laser radiation absorbed by the target with an accuracy of 8% -10%. Thus, the measurement of the electron temperature in the plasma allows us to estimate the flux of laser energy to the target, and its fluctuations allows to monitor the reproducibility of the power of shock waves [15].

1.6. Файл с дополнительными материалами

(при необходимости представления экспертному совету РНФ дополнительных графических материалов к отчету по проекту)

В формате pdf, до 3 Мб. [Скачать...](#)

1.7. Перечень публикаций за год по результатам проекта

(публикации добавляются из списка зарегистрированных участниками проекта публикаций)

1. Ашитков С.И., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Агранат М.Б., Канель Г.И. (Ashitkov, S. I.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Komarov, P. S.; Agranat, M. B. & Kanel, G. I.) **The behavior of iron under ultrafast shock loading driven by a femtosecond laser** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

2. Ашитков С.И., Комаров П.С., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Хохлов В.А., Юркевич А.А., Ильницкий Д.К., Иногамов Н.А., Агранат М.Б. (Ashitkov, S. I.; Komarov, P. S.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Khokhlov, V. A.; Yurkevich, A. A.; Ilnitky, D. K.; Inogamov, N. A.; Agranat, M. B.) **Ablation of gold irradiated by femtosecond laser pulse: experiment and modeling** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

3. Данилов П. А., Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Руденко А. А., Кучмижак А. А., Витрик О. Б., Кульчин Ю. Н., Жаховский В. В., Иногамов Н. А. (Danilov P.A., Zayarny D.A., Ionin

A.A. Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A.) **Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки** Письма в ЖЭТФ (2016 г.)

4. Жаховский В.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А., Анисимов С.И. (Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Inogamov, N. A. & Anisimov, S. I.) **MD simulation of steady shock-wave fronts with phase transition in single-crystal iron.** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

5. Ильницкий Д.К., Хохлов В.А., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А. (Il'nitskiy, D. K.; Khokhlov, V. A.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P., Inogamov, N. A.) **Dynamics of laser ablation at the early stage during and after ultrashort pulse** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

6. Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V.) **Surface 3D nanostructuring by tightly focused laser pulse: simulations by Lagrangian code and molecular dynamics** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

7. Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky) **SIMULATIONS OF SHORT PULSE LASER-MATTER INTERACTION** Lobachevskii Journal of Mathematics (2017 г.)

8. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Мигдал К.П. (Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Migdal K.P.) **Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump** Applied Physics A (2016 г.)

9. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Кучмижак А.А., Кудряшов С.И. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Kuchmizhak, A. A., Kudryashov, S. I.) **Blistering of film from substrate after action of ultrashort laser pulse** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)

10. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П. (Inogamov N. A., Zhakhovsky V. V., Khokhlov V. A., Petrov Y. V., Migdal K. P.) **Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse** Nanoscale Research Letters (2016 г.)

11. Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В., Мигдал К.П., Ильницкий Д.К., Хасегава Н., Нишикино М., Ямагиwa М., Ишино М., Кавачи Т., Фаенов А.Я., Пикуз Т.А., Баба М., Минами Ю., Суемото Т. (Inogamov, N. A.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Il'nitskiy, D. K.; Hasegawa, N.; Nishikino, M.; Yamagiwa, M.; Ishino, M.; Kawachi, T.; Faenov, A. Y.; Pikuz, T.; Baba, M.; Minami, Y. & Suemoto, T.) **Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount.** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

12. Иногамов, Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Анисимов С.И. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P. & Anisimov, S. I.) **RAPID NON-EQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION OF FLYING MOLTEN THIN SHELL CREATED BY FEMTOSECOND LASER ACTION** Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics November 27–28, 2015, Moscow, Russia Book of Abstracts (2015 г.)

13. Кучмижак А.А., Витрик О., Кульчин Ю., Стороженко Д., Майер А., Мирошник А., Макаров С.В., Миличко В.А., Кудряшов С., Жаховский В.В., Иногамов Н.А. (Kuchmizhak, A.; Vitrik, O.; Kulchin, Y.; Storozhenko, D.; Mayor, A.; Mirochnik, A.; Makarov, S.; Milichko, V.; Kudryashov, S.; Zhakhovsky, V. & Inogamov, N.) **Laser printing of resonant plasmonic nanovoids** Nanoscale (2016 г.)

14. Мигдал, К.П., Петров, Ю.В., Ильницкий Д.К., Жаховский В.В., Иногамов, Н.А., Хищенко К.В., Князев, Д.В., Левашов П.Р. (Migdal, K. P.; Petrov, Y. V.; Il'nitskiy, D. K.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Khishchenko, K. V.; Knyazev, D. V. & Levashov, P. R.) **Heat conductivity of copper in two-temperature state** Applied Physics A (2016 г.)

15. Пикуз Т.А., Фаенов А.Я., Озаки Н. ... Жаховский В.В., Сафронова А.С., Стаффорд А., Скобелев И.Я., Пикуз С.А. и др. (Pikuz, T. A.; Faenov, A. Y.; Ozaki, N. ... Zhakhovsky, V.; Inogamov, N.; Safronova, A. S.; Stafford, A.; Skobelev, I. Y.; Pikuz, S. A. et.al.) **Indirect monitoring shot-to-shot shock waves strength reproducibility during pump–probe experiments** Journal of Applied Physics (2016 г.)

16. Хохлов В.А., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Ильницкий Д.К., Мигдал К.П., Шепелев В.В. (V.A.

1.8. В 2016 году возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:

нет

1.9. Показатели реализации проекта

Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением

Показатели кадрового состава научной группы (рассчитываются как округленное до целого отношение суммы количества месяцев, в которых действовали в отчетном периоде в отношении членов научной группы приказы о составе научной группы, к количеству месяцев, в которых действовало в отчетном периоде соглашение)

| Показатели | Единица измерения | 2016 год | |
|---|-------------------|----------|------|
| | | план | факт |
| Число членов научной группы | человек | 12 | 14 |
| Число исследователей в возрасте до 39 лет среди членов научной группы | человек | 3 | 6 |
| в том числе: | | | |
| кандидатов наук в возрасте до 35 лет (включительно) | человек | 1 | 1 |
| аспирантов (интернов, ординаторов) и (или) студентов очной формы обучения | человек | 2 | 3 |
| Количество лиц категории «Вспомогательный персонал» | человек | | 0 |

Публикационные показатели реализации проекта (нарастающим итогом, за исключением показателя «Число цитирований публикаций членов научной группы в научных журналах, индексируемых в международной базе данных «Сеть науки» (Web of Science) в отчетном году», значения показателей формируются автоматически на основе данных, представленных в форме 2о)

Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда и на организацию (в последнем случае – за исключением публикаций, созданных в рамках оказания услуг сторонними организациями).

| Показатели | Единица измерения | 2014 - 2016 г. | |
|--|-------------------|----------------|------|
| | | план | факт |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) | Ед. | 12 | 23 |
| Число цитирований публикаций членов научной группы в научных журналах, индексируемых в международной базе данных «Сеть науки» (Web of Science) в отчетном году | Ед. | 0 | 114 |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Скопус» (SCOPUS) | Ед. | 12 | 24 |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы, индексируемых в базе данных «РИНЦ» | Ед. | 12 | 20 |
| Количество монографий по проекту членов научной группы | Ед. | 0 | 0 |
| Количество зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности по проекту членов научной группы | Ед. | | 0 |

1.10. Информация о представлении достигнутых научных результатов на научных мероприятиях (конференциях, симпозиумах и пр.)

(в том числе форма представления – приглашенный доклад, устное выступление, стендовый доклад и пр.)

Международная конференция

XXX International Conference on Equations of State for Matter, March 1-6, 2016,

Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia

<http://www.ihed.ras.ru/elbrus16/>

Proceedings: Journal of Physics: Conference Series, 2016, in press.

Устный доклад

Khokhlov, V. A., Zhakhovsky, V. V., Khishchenko, K. V., Inogamov, N. A., & Anisimov, S. I.

Metal film on substrate: Dynamics under action of ultra-short laser pulse

Стендовый доклад

Petrov, Y. V., Khokhlov, V. A., Inogamov, N. A., Khishchenko, K. V., & Anisimov, S. I.

Reflectance of thin silver film on the glass substrate at the interaction with femtosecond laser pulses

Международная конференция

The 15th International Conference on X-Ray Lasers

<http://www.wapr.kansai.jaea.go.jp/icxrl2016/>

Nara Kasugano International Forum from May 22 to 27, 2016

Устный доклад

N. Inogamov, V. Zhakhovsky, Yu. Petrov, V. Khokhlov, D. Ilitsky, M. Nishikino, N. Hasegawa, M. Ishino, A.

Faenov, T. Pikuz, T. Kawachi,

"Femtosecond laser ablation: simulations and X-ray imaging,"

Ежегодная научная конференция Института физики (IOP):

IOP annual scientific conference 'PETER 2016':

новые модели и гидрокоды: New Models in Hydrocodes (PETER) 2016

Saint-Malo, France. 29 May - 3 June 2016

<http://physicsworld.com/cws/event/2016/may/29/new-models-in-hydrocodes-peter-2016>

<http://peter16.iopconfs.org/home>

Приглашенный доклад

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, K.P. Migdal, D.K. Ilitsky, S.I. Anisimov,

"Physical models of short pulse ablation,"

Международная конференция

International Symposium "Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies" (FLAMN-16)

June 27- July 01, 2016, St. Petersburg, Pushkin, Russia

<http://ipc.ifmo.ru/flamn16/>

Приглашенный доклад

N.A. Inogamov, S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, K.P. Migdal, D.K. Ilitsky, V.V. Shepelev,

"Physical phenomena caused by laser action onto metals," (физические явления, вызванные лазерным воздействием на металлы)

Международная конференция «Дни Ландау – 2016»

20-22 июня 2016 г., Черногоровка.

Устный доклад

В.А.Хохлов, С.И.Анисимов, Н.А.Иногамов

Динамика металлической пленки на подложке при воздействии фемтосекундного лазерного импульса.

Устный доклад

Ю.В.Петров, С.И.Анисимов, Н.А.Иногамов, В.А.Хохлов

Оптические характеристики пленки серебра при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов.

Устный доклад

Н.А.Иногамов, С.И.Анисимов, Ю.В.Петров, В.А.Хохлов

Особенности лазерной абляции на ранней стадии взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с металлами.

Международная конференция

XIV International Seminar MATHEMATICAL MODELS & MODELING IN LASER PLASMA PROCESSES & ADVANCED SCIENCE TECHNOLOGIES

July 4 - 9, 2016 Moscow, Russia

Пленарный доклад

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, D.K. Ilitsky,

"Hydrodynamic phenomena caused by ultrashort laser pulse,"

Международная конференция

«Supercomputer Simulations in Science and Engineering» SSSE-2016

<http://ssse2016.ac.ru/>

Conference venue: Tallinskaya ul. 34, Moscow

7- 10 September 2016

Пленарный доклад

<http://ssse2016.ac.ru/program.html>

N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, V.V. Zhakhovsky, S.I. Anisimov,

"Simulations of short pulse laser-matter interaction,"

1.11. Все публикации, информация о которых представлена в пункте 1.9, имеют указание на получение финансовой поддержки от Фонда:

да

1.12. Информация (при наличии) о публикациях в СМИ, посвященных результатам проекта нет

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- что при обнародовании результатов выполненного в рамках поддержанного РНФ проекта научная группа ссылалась на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и на организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- что согласен с опубликованием РНФ сведений из отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- что проект не имеет других источников финансирования;
- что проект не является аналогичным* по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников.

* Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

Подпись руководителя проекта _____/С.И.Анисимов/

Сведения о публикациях по результатам проекта
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»,
в 2016 году

Приводится в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку РФФ.

(заполняется отдельно на каждую публикацию, для формирования п. 1.7. отчета)

В карточке публикации все данные приводятся на языке и в форме, используемой базами данных «Сеть науки» (Web of Science), «Скопус» (Scopus) и/или РИНЦ, каждая статья упоминается только один раз (независимо от языков опубликования).

1

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Ашитков С.И., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Агранат М.Б., Канель Г.И.

на английском языке: Ashitkov, S. I.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Komarov, P. S.; Agranat, M. B. & Kanel., G. I.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

The behavior of iron under ultrafast shock loading driven by a femtosecond laser

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

shock wave, femtosecond laser pulses

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

AIP Conference Proceedings

ISSN (при наличии): 0094-243X

e-ISSN (при наличии): 1551-7616

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: файл pdf, скачать

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

.22

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

да

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Ашитков С.И., Комаров П.С., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Хохлов В.А., Юркевич А.А., Ильницкий Д.К., Иногамов Н.А., Агрант М.Б.

на английском языке: Ashitkov, S. I.; Komarov, P. S.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Khokhlov, V. A.; Yurkevich, A. A.; Ilnitsky, D. K.; Inogamov, N. A.; Agranat, M. B.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Ablation of gold irradiated by femtosecond laser pulse: experiment and modeling

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

femtosecond laser pulse, laser ablation

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Physics: Conference Series

ISSN (при наличии): 1742-6588

e-ISSN (при наличии): 1742-6596

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Journal of Physics: Conference Series

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012097/pdf>

2.8. DOI (при наличии)

10.1088/1742-6596/774/1/012097

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

да

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Данилов П. А., Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Руденко А. А., Кучмижак А. А., Витрик О. Б., Кульчин Ю. Н., Жаховский В. В., Иногамов Н. А.

на английском языке: Danilov P.A., Zayarny D.A., Ionin A.A. Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

фемтосекундная лазерная абляция, тонкие пленки

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Письма в ЖЭТФ

ISSN (при наличии): 0370-274X

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

т. 104, 11, с. 780-786

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

http://www.jetpletters.ac.ru/ps/2142/article_32140.shtml

2.8. DOI (при наличии)

10.7868/S0370274X16230041

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: файл pdf, скачать

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

1.172

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

да

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Жаховский В.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А., Анисимов С.И.

на английском языке: Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Inogamov, N. A. & Anisimov, S. I.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 56847780800

2.2. Название публикации

MD simulation of steady shock-wave fronts with phase transition in single-crystal iron.

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

shock waves, moving-window molecular dynamics

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

AIP Conference Proceedings

ISSN (при наличии): 0094-243X

e-ISSN (при наличии): 1551-7616

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты

документа о регистрации исключительных прав)

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

.22

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Ильницкий Д.К., Хохлов В.А., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А.

на английском языке: Ilnitskiy, D. K.; Khokhlov, V. A.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P., Inogamov, N. A.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8055-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 36091200200

2.2. Название публикации

Dynamics of laser ablation at the early stage during and after ultrashort pulse

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

laser ablation, ultrashort laser pulse, two-temperature state

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Physics: Conference Series

ISSN (при наличии): 1742-6588

e-ISSN (при наличии): 1742-6596

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

v. 774, 1, p. 012101

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012101/pdf>

2.8. DOI (при наличии)

10.1088/1742-6596/774/1/012101

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

6

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А, Жаховский В.В.

на английском языке: Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Surface 3D nanostructuring by tightly focused laser pulse: simulations by Lagrangian code and molecular dynamics

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

Surface nanostructuring, tightly focused laser pulse, molecular dynamics

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Physics: Conference Series

ISSN (при наличии): 1742-6588

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

681, 012001

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

[http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/681/1/012001/meta;jsessionid=C0CADB3B3B5E03DA43C7D6BBAED041F0.ip-10-40-2-225)

[6596/681/1/012001/meta;jsessionid=C0CADB3B3B5E03DA43C7D6BBAED041F0.ip-10-40-2-225](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/681/1/012001/meta;jsessionid=C0CADB3B3B5E03DA43C7D6BBAED041F0.ip-10-40-2-225)

2.8. DOI (при наличии)

10.1088/1742-6596/681/1/012001

Accession Number WoS (при наличии): 000376042800001

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84962921295

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

7

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Жаховский В.В.

на английском языке: N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

SIMULATIONS OF SHORT PULSE LASER-MATTER INTERACTION

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

Computer physics, multiprocessors simulation, laser-matter interaction, thin film ablation

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указывается название издательства, город)

Lobachevskii Journal of Mathematics

ISSN (при наличии): 1995-0802

e-ISSN (при наличии): 1818-9962

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: файл pdf, скачать

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

на русском языке: Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Мигдал К.П.

на английском языке: Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Migdal K.P.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

Laser-induced spalling, subpicosecond laser pulse, microbump

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Applied Physics A

ISSN (при наличии): 0947-8396

e-ISSN (при наличии): 1432-0630

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

122:432

Месяц и год публикации: 04.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00339-016-9942-9>

2.8. DOI (при наличии)

10.1007/s00339-016-9942-9

Accession Number WoS (при наличии): 000375444000014

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84961564529

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

9

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Кучмижак А.А., Кудряшов С.И.

на английском языке: Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Kuchmizhak, A. A., Kudryashov, S. I.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Blistering of film from substrate after action of ultrashort laser pulse

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

ultrashort laser pulse, thin metal film, two-temperature state

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Physics: Conference Series

ISSN (при наличии): 1742-6588

e-ISSN (при наличии): 1742-6596

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

v. 774, 1, p. 012102

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012102/pdf>

2.8. DOI (при наличии)

10.1088/1742-6596/774/1/012102

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П.

на английском языке: Inogamov N. A., Zhakhovsky V. V., Khokhlov V. A., Petrov Y. V., Migdal K. P.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

Ultrashort laser pulse, Thin film on substrate, Formation of microbump, Molecular dynamics

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Nanoscale Research Letters

ISSN (при наличии): 1931-7573

e-ISSN (при наличии): 1556-276X

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

11, 177

Месяц и год публикации: 05.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/s11671-016-1381-1>

2.8. DOI (при наличии)

10.1186/s11671-016-1381-1

Accession Number WoS (при наличии): 000373635900001

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84962783595

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.584

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В., Мигдал К.П., Ильницкий Д.К., Хасегава Н., Нишикино М., Ямагива М., Ишино М., Кавачи Т., Фаенов А.Я., Пикуз Т.А., Баба М., Минами Ю., Суемото Т.

на английском языке: Inogamov, N. A.; Khokhov, V. A.; Petrov, Y. V.; Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Ilnitsky, D. K.; Hasegawa, N.; Nishikino, M.; Yamagiwa, M.; Ishino, M.; Kawachi, T.; Faenov, A. Y.; Pikuz, T.; Baba, M.; Minami, Y. & Suemoto., T.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 700413551

2.2. Название публикации

Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount.

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

laser-matter interactions, ultrashort laser pulses, surface microstructures

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

AIP Conference Proceedings

ISSN (при наличии): 0094-243X

e-ISSN (при наличии): 1551-7616

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: файл pdf, скачать

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

.22

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

12

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов, Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Анисимов С.И.

на английском языке: Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P. & Anisimov, S. I.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

RAPID NON-EQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION OF FLYING MOLTEN THIN SHELL CREATED BY FEMTOSECOND LASER ACTION

2.3. Год публикации

2015

2.4. Ключевые слова

ultrashort laser pulses, surface nanostructures

2.5. Вид публикации

тезисы

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics November 27–28, 2015, Moscow, Russia Book of Abstracts

ISSN (при наличии): ---

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

р. 68-69

Месяц и год публикации: 11.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

http://www.ihed.ras.ru/npp2015/abstracts/npp2015_abstracts.pdf

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

нет

2.11. Импакт-фактор издания

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

нет

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

нет

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Кучмижак А.А., Витрик О., Кульчин Ю., Стороженко Д., Майер А., Мирошник А., Макаров С.В., Миличко В.А., Кудряшов С., Жаховский В.В., Иногамов Н.А.

на английском языке: Kuchmizhak, A.; Vitrik, O.; Kulchin, Y.; Storozhenko, D.; Mayor, A.; Mirochnik, A.; Makarov, S.; Milichko, V.; Kudryashov, S.; Zhakhovsky, V. & Inogamov, N.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Laser printing of resonant plasmonic nanovoids

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

resonant plasmonic nanostructures, femtosecond nanoablation

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Nanoscale

ISSN (при наличии): 2040-3364

e-ISSN (при наличии): 2040-3372

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

8, 12352-12361

Месяц и год публикации: 05.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2016/NR/C6NR01317A#!divAbstract>

2.8. DOI (при наличии)

10.1039/C6NR01317A

Accession Number WoS (при наличии): 000378244900031

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84975502561

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

7.76

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

да

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

14

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Мигдал, К.П., Петров, Ю.В., Ильницкий Д.К., Жаховский В.В., Иногамов, Н.А., Хищенко К.В., Князев, Д.В., Левашов П.Р.

на английском языке: Migdal, K. P.; Petrov, Y. V.; Il'nitsky, D. K.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Khishchenko, K. V.; Knyazev, D. V. & Levashov, P. R.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Heat conductivity of copper in two-temperature state

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

electron transport, noble metal nanofilms, femtosecond laser pulse, first-principle calculations, two-temperature hydrodynamics, molecular dynamics simulation

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Applied Physics A

ISSN (при наличии): 0947-8396

e-ISSN (при наличии): 1432-0630

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

122:408

Месяц и год публикации: 03.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00339-016-9757-8>

2.8. DOI (при наличии)

10.1007/s00339-016-9757-8

Accession Number WoS (при наличии): 000372259900149

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84977564377

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

1.444

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

15

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Пикуз Т.А., Фаенов А.Я., Озаки Н. ... Жаховский В.В., Сафронова А.С., Стаффорд А., Скобелев И.Я., Пикуз С.А. и др.

на английском языке: Pikuz, T. A.; Faenov, A. Y.; Ozaki, N. ... Zhakhovsky, V.; Inogamov, N.; Safronova, A. S.; Stafford, A.; Skobelev, I. Y.; Pikuz, S. A. et.al.

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8112-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Indirect monitoring shot-to-shot shock waves strength reproducibility during pump-probe experiments

2.3. Год публикации

2016

2.4. Ключевые слова

pump-probe experiments, shock waves

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

Journal of Applied Physics

ISSN (при наличии): 0021-8979

e-ISSN (при наличии): 1089-7550

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

120, 035901

Месяц и год публикации: 07.2016

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/120/3/10.1063/1.4958796>

2.8. DOI (при наличии)

10.1063/1.4958796

Accession Number WoS (при наличии): 000381382500041

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-84979298684

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: ---

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

2.101

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

да

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

16

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Хохлов В.А., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Ильницкий Д.К., Мигдал К.П., Шепелев В.В.

на английском языке: V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal and V.V. Shepelev

WoS Researcher ID (при наличии): Q-8055-2016

Scopus AuthorID (при наличии): 36091200200

2.2. Название публикации

Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

ultrashort laser pulse, thin metal film

2.5. Вид публикации

статья

2.6. Название издания (для монографий также указываются название издательства, город)

AIP Conference Proceedings

ISSN (при наличии): 0094-243X

e-ISSN (при наличии): 1551-7616

ISBN (при наличии): ---

2.7. Выходные данные публикации (номер, том, выпуск, страницы, реквизиты документа о регистрации исключительных прав)

Месяц и год публикации: ---

Адрес электронной версии публикации (URL) в открытом источнике (при наличии):

2.8. DOI (при наличии)

Accession Number WoS (при наличии): ---

Scopus EID (при наличии): ---

2.9. Принята к публикации (указывается в случае официального принятия к публикации в последующих изданиях, положительного решения о регистрации исключительных прав)

Для принятых к публикации материалов п. 2.7 не заполняются.

да

Письмо из редакции или издательства с извещением о принятии рукописи к публикации: файл pdf, скачать

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

да

2.11. Импакт-фактор издания

.22

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

да

2.15. В публикации:

В качестве источника финансирования исследования указан грант Российского научного фонда

да

Указаны иные источники финансирования (в том числе указаны несколько грантов Российского научного фонда), помимо данного гранта Российского научного фонда

нет

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

Подпись руководителя проекта _____/С.И. Анисимов/

**Итоговый отчет о выполнении проекта
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»**

(представляется в последний год практической реализации проекта вместе с отчетом о выполнении проекта)

5.1. Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы (в соответствии с исходной заявкой)

1. Будет написан многомерный гидрокод для расчета трехмерных эффектов, возникающих на границе кратера, возникающего в твердой мишени под действием ультракоротких лазерных импульсов. В гидрокоде, как и его одномерном аналоге, будет учтено возбуждение электронной подсистемы, теплопроводность, обмен энергией между электронами и ионами. Многомерный гидрокод будет применен для решения задачи об отрыве металлической пленки от диэлектрической подложки под действием фемтосекундного лазерного импульса. Проведенное с помощью многомерного гидродинамического кода исследование задач о границе кратера и отрыве металлической пленки от диэлектрической подложки будет в дальнейшем использовано для оптимизации параметров в молекулярно-динамическом моделировании этих задач с целью уменьшить трудоемкость молекулярно-динамических расчетов.
2. Будет начато решение сложной задачи о формировании и эволюция поверхностных структур в режиме повторяющихся выстрелов (multi-shots). Здесь требуется применение разнообразных средств: многомерного моделирования тепловых задач, многомерных гидродинамических расчетов и молекулярной динамики.
3. Будет начато решение задачи о динамике дислокаций, создаваемых в веществе мишени под действием ультракоротких лазерных импульсов, их зарождении, движении, размножении. Создание дислокационной модели будет нацелено на ее включение в гидродинамические расчеты с целью заменить ими часть более громоздких молекулярно-динамических вычислений.
4. Будут рассмотрены подходы к решению задачи о лазерной абляции металлов в конденсированную среду под действием ультракоротких импульсов, в которой наибольший интерес представляет распространение вещества мишени в окружающем веществе.
5. Будет проведен анализ задачи об облучении наночастиц ультракоротким лазерным импульсом.
 - 1). Важной составляющей работы по гранту РФ являются исследования наноструктурирования поверхности мишеней в результате воздействия ультракороткого лазерного импульса (УКЛИ). Эти работы имеют широкий круг приложений, например, изменение оптических характеристик обработанной поверхности или резкое изменение смачиваемости – после обработки гидрофильная поверхность превращается в гидрофобную. В 2015 г. будет закончен цикл работ по изучению трансформации наноструктур в зависимости от размера пятна фокусировки на поверхности мишени. Морфология структур качественно меняется при уменьшении пятна воздействия, так сказать некоторые формы просто «не помещаются» в малых пятнах. Будет изучено, каким образом параметры мишени, речь идет о пленках, напыленных на подложки, сказываются на характере наноструктур. Поскольку темп остывания определяет темп рекристаллизации структур, а от соотношения между скоростью рекристаллизации и гидродинамическими скоростями зависит морфология, то ясно, что меняя параметры тепловой задачи можно управлять формированием структур. Такой подход потенциально может иметь важные последствия для будущих технологий выращивания наноструктур заданного вида.
 - 2). Будет продолжена деятельность по изучению свойств веществ в состояниях с возбужденной

электронной подсистемой. Термализация электронов при сильных возбуждениях (температуры электронной подсистемы единицы эВ) происходит быстро, за несколько фемтосекунд, поэтому можно говорить о горячих электронах и о двухтемпературной системе. Наши предыдущие исследования опирались на решение кинетического уравнения в приближении времени релаксации. Новым при этом было то, что не предполагалась малость электронной температуры по сравнению с энергией Ферми. При этом использовались результаты нашего моделирования с помощью теории функционала плотности (DFT, Density Functional Theory) для определения электронного спектра, вычислялась плотность электронных состояний конкретных металлов. Параметры спектра входили в решение кинетического уравнения. В 2015 г. будут применены новые методики, которые используют технику квантовой молекулярной динамики (QMD, Quantum Molecular Dynamics), обобщенную на двухтемпературный (2T) случай (2T-QMD).

Пока работы в этом направлении, которые мы считаем весьма перспективными, можно пересчитать по пальцам. Они ведутся только 1-2-мя коллективами, которые являются крупными специалистами по DFT и QMD. Нам предстоит выяснить влияние ионной упорядоченности (нагрев, плавление) на двухтемпературное уравнение термодинамического состояния. И сверить полученные данные с нашими и другими литературными данными, которые были получены в обычно молчаливо предполагавшемся предположении о независимости электронной и ионной подсистем (1 - электронный спектр реагирует на плотность, но не на упорядоченность, а значит ионную температуру; 2 – межатомное взаимодействие слабо реагирует на электронную температуру).

Другая важная составляющая – это вычисление с помощью QMD и формулы Кубо-Гринвуда проводимости и теплопроводности двухтемпературного вещества в твердом и жидком состояниях. Требуется вычислить проводимость и теплопроводность и сверить полученное с нашими предыдущими вычислениями с помощью кинетической теории и тау-приближения. С одной стороны это проверка наших предыдущих вычислений, с другой это серьезный способ расчета транспортных свойств двухтемпературной конденсированной фазы.

3). Много сил потрачено в отчетном году на молекулярно-динамические расчеты ударных волн (в основном алюминий и никель) двухступенчатой формы (упругий и пластический скачки). С другой стороны, были проведены гидродинамические расчеты по двум моделям пластичности (модель Прадтля-Рейса и дислокационная модель). В 2015 г. эта работа будет продолжена, в результате будут получены эмпирические параметры, входящие в эти модели в условиях, которые характерны для лазерных экспериментов.

4). Будут выполнены гидродинамические и тепловые расчеты с помощью разностных (не МД) многомерных кодов. Коды были разработаны и приспособлены к условиям лазерного эксперимента в течение предыдущего этапа выполнения гранта РФФИ. Теперь предстоит применить их для практических расчетов. Это позволит нам анализировать существенно неоднородные ситуации на больших временах порядка наносекунд, до которых нелегко «дотянуть» МД моделирование.

Данный подход позволит нам исследовать важные явления инкубации при нескольких последовательных лазерных выстрелах. Кроме того, будет видно, как устроены зона, в которой поглощенный флюенс пересекает порог абляции.

5). Будут выполнены расчеты разогрева, перехода в двухтемпературное состояние, двухтемпературной релаксации электронной и ионной подсистем, вместе с описанием гидродинамического расширения сферической наночастицы после воздействия на неё УКЛИ. Мы

изучим как случай расширения в вакуум, так и случай, когда наночастица погружена в окружающую среду. Окружающая среда будет либо жидкой (эмульсия наночастиц), либо твердой (твердый раствор наночастиц). Это важная для практики часть нашей работы в 2015 г. Дело в том, что такие воздействия уже применяются в опытах для изменения распределения наночастиц по размерам или для их разрушения.

6). Будет продолжено решение задачи об абляции твердой мишени в конденсированную (твердую или жидкую) среду. На сегодня с такого рода абляцией связан основной способ производства наночастиц.

7). Будет разработан новый EAM (Embedded Atom Model) потенциал железа. МД расчеты полиморфных превращений в ударных волнах в железе невозможны без потенциала, который корректен в области альфа – эpsilon перехода. EAM потенциал основан на нахождении трех функций. Эти функции в нашем подходе аппроксимируются рациональными функциями. Подгонка коэффициентов трех рациональных функций EAM будет осуществляться с помощью метода подгонки напряжений (stress-matching method) по базе данных напряжений рассчитанных из первых принципов. В базу данных будут вноситься компоненты тензора напряжений, рассчитанных при однородном и трех одноосных сжатиях кристалла в широком диапазоне давлений при абсолютном нуле температуры. Известные давления, при которых происходят фазовые переходы ОЦК решетки железа в ГПУ и ГЦК решетки, также будут использованы в качестве условий подгонки. Кроме того, в базу данных будут входить такие экспериментальные величины как упругие постоянные, энергия связи кристалла, и энергия образования вакансии.

8) В план 2015 г. вносится также новая задача, которая не входила в первоначальную заявку на грант РФФИ. Речь идет о генерации ударной волны лазерным импульсом и явлениях, которые возникают на тыльной стороне пленки. Лазер воздействует на фронтальную сторону пленки. Пленка имеет две границы – фронтальную и тыльную. Тыльная сторона может быть контактом с вакуумом или с конденсированной средой (твердой или жидкой). Воздействие лазера создает ударную волну, которая распространяется от фронтальной стороны к тыльной границе.

Выход ударной волны на тыльную границу изучался ранее в наших работах и работах других авторов. При этом первоначально тыльная граница была гладкой (идеальная плоскость без возмущений). Новая интересная постановка, которая будет исследована в 2015 г., связана с постановкой, в которой на тыльной границе имеются начальные (т.е. до прихода ударной волны) возмущения. Это обобщение классической задачи о гидродинамической неустойчивости Рихтмайера-Мешкова на случай лазерной инициации ударной волны и конденсированных сред. Интерес представляет разрушение возмущенной границы и генерация твердых или жидких наночастиц. 1). За 2015 г. созданы физические модели и численные коды для задачи о структурировании металлической пленки

при воздействии на нее сфокусированного на дифракционном пределе ультракороткого лазерного импульса (см. пп. 1.3 и 1.6 отчета). Получено представление о режимах структурирования. Задача эта является важной для приложений и востребованной экспериментаторами.

В 2016 г. будут выполнены совместные работы нашего коллектива с экспериментальными лабораториями в ИВТ, ФИАНе и ИАПУ ДВО РАН. Будут выяснены возможности оптимизации структур для наноплазмоники.

2). Будут продолжены исследования термодинамических и кинетических характеристик металлов с разной структурой электронных энергетических зон в неравновесном состоянии с отличающимися температурами электронов и ионов. Эти характеристики металла очень важны для применения в гидродинамическом коде,

используемом для описания динамики абляции вещества под действием ультракоротких лазерных импульсов.

Кроме того, термодинамика и кинетика электронов определяет изменение оптических свойств металла в двухтемпературном (2Т) состоянии и тем самым оказывает влияние на отклик вещества мишени на воздействие пробных лазерных импульсов, используемых для оптической диагностики процесса абляции. Поэтому в плане работы на 2016 год предусматривается исследование влияния 2Т ситуации на оптические свойства металлов, в первую очередь благородных. Будет исследовано изменение коэффициента отражения тонких пленок этих металлов в процессе гидродинамического движения пленок при поверхностной плотности энергии лазерного излучения, меньшей порога абляции. При этом вещество мишени в течение всего процесса находится в твердой фазе.

Для больших значений интенсивности лазерного излучения, когда происходит плавление металла в области прогрева, будут вычислены кинетические коэффициенты рассматриваемых жидких металлов в 2Т состоянии.

Будут построены 2Т уравнения состояния (2Т-УрС) меди на основе данных 2Т квантового молекулярно-динамического расчёта, проведённого в 2015 году. Данное 2Т-УрС совместно с полученными в 2015 году из первых принципов кинетическими коэффициентами меди будет применено для 2Т гидродинамического моделирования лазерных мишеней.

3). 2Т гидродинамические (ГД) расчеты намного экономичнее молекулярно-динамических (МД) расчетов.

Поэтому в 2016 г. будет продолжена разработка одномерных в плоской и сферической геометрии и многомерных ГД кодов. При этом постоянно будет проводиться сравнения с результатами МД моделирования одинаковых задач. Сравнение будет производиться на задачах лазерной абляции, когда картина течения охватывает нагретый лазером слой, и на задаче о выходе ударной волны на тыльную сторону пленки или пластины.

4). Будут выполнены работы по моделированию лазерного воздействия, когда поглощающая мишень находится в контакте с прозрачным твердым или жидким веществом. Причем облучение идет через прозрачное вещество. В случае воды будет использован межатомный потенциал воды, разработанный в 2015 г.

5). Важной является задача о воздействии субнаносекундного оптического лазерного импульса на пленки толщиной несколько микрон. При этом диагностика осуществляется ультракоротким (длительность 10-100 фс) жестким (фотон 10-12 кэВ) импульсом рентгеновского лазера (РЛ) на свободных электронах. С помощью импульса РЛ и его рентгеновской дифракции на мишени осуществляют диагностику состояния вещества в твердом состоянии при давлениях порядка мегабара. Методика создана для исследования фазовых превращений при значительных сжатиях. Предстоит исследование ГД отклика пленки на оптическое лазерное воздействие. Это необходимо, чтобы расшифровать экспериментальный сигнал, содержащий как термодинамические, так и гидродинамические сведения.

5.2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты (за все годы, не более 10 стр.)

В рамках выполнения работ по проекту было налажено тесное сотрудничество с учеными ведущих мировых научных учреждений, занимающихся проблемами, близкими к тематике проекта.

Совместно с японскими учеными из Kansai Photon Science Institute (группа проф. Кавачи) были выполнены экспериментальные и теоретические исследования по изучению физических свойств

различных материалов - металлов и диэлектриков в состояниях с сильно возбужденной поглощением ультракоротких лазерных импульсов электронной подсистемой. Рассмотрен нагрев пикосекундным импульсом мягкого рентгеновского лазера (длина волны света 13.9 нм) электронной подсистемы металлов Al и Cu и диэлектрика с уникально большой шириной запрещенной зоны LiF. Сочетанием экспериментов по оценке нагрева электронной подсистемы по вспышке излучения от нагретой поверхности мишени и расчетов по двухтемпературной теории была выполнена оценка максимальной электронной температуры при флюенсах (поверхностной плотности энергии излучения), близких к порогу абляции (отрыву вещества от мишени). Из этих расчетов было получено, что в примененном диапазоне флюенсов температура электронов составляет не слишком большую величину около 1 эВ, обусловленную большой величиной диэлектрической щели в случае диэлектрика и возбуждением электронов из низколежащих зон в металлах [3,8].

Распределение вещества мишени из золота при абляции под действием фемтосекундного излучения титан-сапфирового лазера оптического диапазона исследовалось экспериментально (в сотрудничестве с коллегами из Kansai Photon Science Institute) и теоретически. В экспериментах в pump-probe технике в качестве пробного луча использовалось излучение мягкого рентгеновского диапазона (энергия фотона 89 эВ, длина волны 13.9 нм). Использование рентгеновского света для диагностики имеет важные преимущества. Свет с такой длиной волны позволяет рассматривать интерференционную картину, в частности, получать кольца Ньютона при гораздо меньших смещениях поверхности лазерной мишени, чем для света оптического диапазона. С другой стороны, в отличие от пробного излучения оптического диапазона наблюдения за разлетом вещества мишени в рентгеновском диапазоне можно наблюдать не только на протяжении 1-10 нс, но и на более поздних временах (порядка мкс), потому что поглощение рентгеновских лучей пропорционально массе вещества на пути, пройденном лучами. Экспериментальные результаты были сравнены с результатами, полученными в гидродинамическом и молекулярно-динамическом моделировании. Рассчитанные асимптотические значения скорости отлетевшего от мишени жидкого слоя находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [5].

Совместно с немецкими коллегами из Kaiserslautern University, Kassel University, Fritz Haber Institute of the Max Planck Society изучен отклик простого металла (Al) на возбуждение $2p$ дырок ультракоротким лазерным импульсом мягкого рентгеновского диапазона. Проведен молекулярно-динамический расчет с учетом изменения потенциала межатомного взаимодействия из-за возникновения дырок. Изменение потенциала вычислено с помощью кода WIEN2k. Показано, что процесс плавления после возбуждения дырок по-прежнему определяется в основном электрон-фононной динамикой. Эффект изменения межатомного потенциала оказывается незначительным, он ограничен временем жизни дырки порядка 100 фс. Это время порядка дебаевского времени для решетки [11].

В ходе выполнения работ по проекту большая теоретическая и вычислительная работа сочеталась с проведением совместных экспериментов с ведущими экспериментальными группами в рассматриваемой области. Поставлены эксперименты и проведены большие теоретические и численные исследования гидродинамических течений, возникающих в веществе лазерной мишени при воздействии на нее остросфокусированным ультракоротким лазерным импульсом. Решение связанных с этим вопросов представляет большой интерес как с точки зрения физики происходящих процессов, так и для важных практических приложений при получении наночастиц контролируемого размера, при лазерном печатании биосенсоров, а также пленочных транзисторов, квантовых точек, сборке других изделий микроэлектроники, при переносе порошков и наночастиц с подложки на ресивер. Эксперименты, проведенные при тесном сотрудничестве научных групп из ФИАН, МИФИ, ИАГУ ДВО РАН, ДФУ, ВНИИА им. Н.Л.

Духова, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН по облучению фемтосекундными лазерными импульсами пленки серебра, нанесенной на стеклянную подложку, впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом высокого разрешения был использован химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС). Определялись интенсивности линий характеристического рентгеновского L-излучения серебра и K-излучения кремния из подложки. Это позволило в экспериментах четко следить за распределением вещества при лазерной абляции серебряной пленки. Были проведены эксперименты при различной величине поверхностной плотности лазерного излучения (флюенса) с длительностью импульса 200 фс. Величина флюенса в экспериментах составляла 0.37 Дж/см², 0.53 Дж/см², 1.05 Дж/см². Получены изображения в сканирующем микроскопе структур, образующихся на поверхности пленки в процессе поглощения ультракороткого лазерного импульса, возникновения двухтемпературного состояния в веществе пленки, распространения тепла от поверхности вглубь пленки, плавления, гидродинамического движения вещества, его остывания и вторичной кристаллизации для всех трех значений флюенса. Полученные структуры сильно отличаются по форме, являя собой многообразие имеющих практическое значение наноструктурных видоизменений поверхности, в частности, для целей нанооптики [14].

Была проведена большая группа теоретических исследований с молекулярно-динамическим моделированием проведенных экспериментов. В качестве материала для исследования был выбран другой благородный металл – золото. При молекулярно-динамическом моделировании важным является потенциал взаимодействия атомов, участвующих в моделировании. В ходе выполнения работ по проекту нами был разработан учитывающий многочастичные взаимодействия в металлах потенциал метода погруженного атома для золота. Параметры в нем находились из проведенных методом функционала плотности квантомеханических расчетов электронных состояний и энергии кристалла при одноосных деформациях, чтобы максимально учесть условия растяжения вещества мишени при лазерной абляции. Для описания всех стадий абляции, включающих поглощение излучения, нагрев пленки, ее плавление, движение расплава, его кристаллизацию требуется рассмотрение области мишени, содержащей не менее 10^{11} атомов. Напрямую моделирование с таким количеством атомов пока находится за пределами возможностей молекулярно-динамического подхода. Однако эта трудность была нами преодолена с использованием двух важных решений. Движение пленки было разделено на два этапа. Первый – это движение пленки от момента поглощения лазерного импульса до отделения ее от подложки. На этом этапе существенно использована малость толщины пленки по сравнению с диаметром лазерного пятна на мишени. Эта малость позволила нам рассматривать каждую локальную точку на плоскости подложки в одномерном приближении с помощью разработанного нами в ходе выполнения проекта двухтемпературного гидродинамического кода без использования более трудоемкой молекулярной динамики. В созданном гидродинамическом коде использованы полученные нами двухтемпературные термодинамические функции вещества металла с неравными температурами электронов и ионов и двухтемпературные кинетические коэффициенты, определяющие распространение тепла по веществу мишени. В результате решения системы гидродинамических уравнений определяются поля скорости и температуры как функции расстояния до центра пятна на момент отделения пленки от подложки. Далее эти поля используются в качестве начальных данных при молекулярно-динамическом моделировании полета, остывания и кристаллизации пленки в трехмерной геометрии. Чтобы промоделировать в молекулярно-динамическом подходе эту более позднюю стадию с используемым нами числом атомов, составляющим $(2 \div 200) \cdot 10^6$, на 3-5 порядков меньшим, чем в экспериментальной ситуации, мы воспользовались гидродинамическим подобием, позволяющим заменить систему с большим числом атомов системой с меньшим числом с равными безразмерными параметрами подобия. Число таких параметров в рассматриваемой задаче равно двум (капиллярный,

задающий отношение скорости за счет капиллярных сил к скорости вещества в пленке и параметр охлаждения, равный отношению скорости фронта кристаллизации к скорости вещества). Это позволило провести молекулярно-динамическое моделирование на большом интервале времени от стадии отделения жидкой пленки от подложки до ее замерзания. Такое моделирование для пленки золота на стеклянной подложке для трех случаев, отличающихся величиной флюенса лазерного излучения, соответствующих условиям проведенных нами экспериментов на пленке серебра, показало полное соответствие структур, образующихся на поверхности пленки, наблюдавшихся в экспериментах и в результате компьютерного моделирования [2,6,7,9,19,25].

Проведено молекулярно-динамическое моделирование движения атомов в пленке золота на диэлектрической подложке с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и решеткой методом Монте-Карло. Для этого каждый ион содержал один электрон, что обеспечивало электронейтральность рассматриваемой системы в любой момент времени. Соседние атомы обменивались электронами с частотой, которая находилась из известного по экспериментальным данным для жидкого золота коэффициента теплопроводности. Пары атомов, в которых осуществлялся обмен электронами выбирались случайно, ограничиваясь только положениями, находящимися внутри радиуса обрезания. Кроме того, был в том же методе Монте-Карло произведен учет обмена энергией между электронами и ионами. Для расчета динамики ионов использовался написанный нами межатомный потенциал с учетом многочастичных эффектов в приближении погруженного атома. Чтобы использовать при моделировании образования наноструктур на поверхности мишени достижимое в расчетах число атомов, которое на несколько порядков меньше присутствующего в физически важной области мишени, использовалось гидродинамическое подобие с двумя безразмерными параметрами, совпадающими для реальной физической области задачи и для модельной системы с существенно меньшим числом атомов. Получена картина формирования наноструктур на поверхности пленки золота посредством образования струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания оставшейся на мишени части в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части купола. С возрастанием поглощенного флюенса и увеличением начальной скорости движения, уменьшением капиллярного параметра подобия наблюдается разрушение жидкой оболочки над кратером в мишени вблизи зоны фазового перехода жидкость-твердое тело с образованием небольшого количества менее вытянутых струек. Их отвердевание вызывает появление структуры на поверхности мишени в виде нанокороны. Такие структуры, идентифицированные нами в молекулярно-динамическом моделировании, наблюдались и в натуральных экспериментах с пленками благородных металлов [16,17,25].

Численно и экспериментально рассмотрен эффект воздействия импульсов титан-сапфирового лазера фемтосекундного диапазона длительности на 60-100 нм пленки золота, помещенные на стеклянный субстрат. Энергия в импульсе бралась достаточной для абляции пленки. Впервые нами показано, что есть несколько различных режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от значения поглощенного флюенса (поверхностной плотности энергии лазерного излучения) и адгезионной прочности между пленкой и подложкой. А именно, при слабой адгезии существует пороговое значение флюенса, при котором начинается отслоение пленки (порог отслоения), а также порог начала абляции (разрушения пленки).

Выше нижнего порога (порога отслоения) вся пленка отслаивается от подложки. Выше более высокого порога абляции в пленке возникает разрыв вблизи ее средней части.

Внешняя половина пленки отделяется, а ее внутренняя половина остается на стеклянной подложке. Для пленок из золота и серебра высокой степени чистоты существуют оба указанных пороговых значения флюенса, т.к. такие пленки как раз слабо связаны со стеклом. Порог

отслоения исчезает в случае сильной адгезии металла и подложки, в этом случае отслоение пленки в целом становится невозможным. Разрыв же пленки при превышении порога абляции при этом по-прежнему происходит, потому что величина порога абляции не зависит от сцепления металла с подложкой. Экспериментально большая величина адгезии получена нами при помещении между золотом и стеклом промежуточного тонкого слоя хрома. Скорость пленки после того, как она отделяется от подложки, мала в диапазоне флюенсов, находящемся между двумя пороговыми значениями, потому что акустический импеданс стекла мал по сравнению с импедансом пленки из золота. Поэтому в ходе процесса отслоения абсолютные значения (положительные или отрицательные) давлений в области контакта металла и подложки в несколько раз меньше, чем абсолютная величина давления в золотой пленке. Однако выше порога абляции скорость внешней части пленки становится в несколько раз больше, потому что эта скорость не зависит от величины акустического импеданса подложки. Это обстоятельство объясняет, почему на поверхности мишени после лазерного воздействия появляются такие трехмерные структуры, как наноструи над выпуклостями нанометровых размеров в случае слабого сцепления. Скорость пленки при этом должна быть не слишком большой. Это позволяет силам поверхностного натяжения и происходящей из-за отвода тепла кристаллизации расплавленной пленки остановить расширение выпуклости и отрыв и удаление верхней ее части [12,19,27].

Рассмотрена эволюция во времени индуцированных ударной волной выбросов с поверхности металла, имеющей микронного размера возмущения, характерные для лазерных воздействий, в форме микроскопических кумулятивных струй, генерируемых от такой поверхности. В реальных экспериментальных условиях очень трудно проследить за пространственно-временной эволюцией таких струй. Аналитическое описание их развития также затруднено из-за нелинейности задачи. Поэтому для изучения деталей образования струй был применен численный гидродинамический метод сглаженных частиц и молекулярно-динамическое моделирование. Размеры используемых в молекулярно-динамическом моделировании образцов сильно ограничены из-за ограниченности вычислительных ресурсов, но проведением масштабирования размеры реалистичных образцов можно достаточно хорошо моделировать доступным для расчета количеством атомов. Чтобы проверить возможности такого масштабирования проведен сравнительный анализ расчетов по молекулярной динамике и гидродинамическому методу сглаженных частиц для олова. Гидродинамическое моделирование выполняется для реальных экспериментальных размеров, в то время как для молекулярно-динамического используются пропорционально уменьшенные с учетом подобия. Показано, что распределение скорости и массы вдоль струй, моделируемые в обоих подходах, находятся в хорошем согласии [4].

Впервые было проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот, изготовленных воздействием одиночных ультракоротких импульсов лазерного излучения на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. Было найдено, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра полностью определяются размером нанопустот. Эти окрашенные геометрические резонансы были связаны нами с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод высокого порядка в нанопустотах. Это было со всей определенностью показано с помощью комплексного вычислительного подхода, который включает в себя двухтемпературную гидродинамику металла пленки, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование распределения материала внутри нанопустот и последующие электромагнитные расчеты, опирающиеся на полученные при таком моделировании формы нанопустот. Экспериментально обнаружено 6-кратное в среднем усиление сигнала фотolumинесценции от слоев комплексных солей алкилированного европия, внедренных в

органическую матрицу, и молекул красителя родамина 6G (R6G) на пленке серебра. Кроме того, отдельные нанопустоты в серебре показывают пространственно усредненное усиление рамановского сигнала на R6G в $5 \cdot 10^4$ раз, а также зависящее от формы и размера усиление фотолюминесценции, достигающее до 13 раз для конкретных наноструктур. Созданная малозатратная эффективная методика изготовления нанополостей в благородных металлах может быть использована для окрашивания металлов, высокопроизводительной и дешевой печати субстратов для плазмоники, Представленная в результате выполнения работ по проекту высокорентабельная лазерная печать на основе быстрого плавления, деформации и повторного затвердевания тонких пленок благородных металлов дает хорошо контролируемый способ создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости с очень гладкими стенками, Он представляется значительно более выгодным и эффективным по сравнению с другими способами их изготовления, например, на основе осаждения металла на нанотекстурированный шаблон [20].

Отличие температур электронов и ионов в металле, достигающее даже для лазерных импульсов умеренной интенсивности величин порядка нескольких эВ, приводит к необходимости использования двухтемпературных термодинамических функций и кинетических коэффициентов, входящих в систему гидродинамических уравнений. Эти двухтемпературные термодинамические функции и кинетические коэффициенты на ранней стадии взаимодействия с лазерным излучением определяют динамику разлета вещества мишени в процессе абляции. Исследование внутренних свойств металлов в двухтемпературных состояниях как важнейшая задача при изучении их абляции под действием ультракоротких лазерных импульсов проведено в ходе выполнения проекта. При этом для исследования динамики вещества в процессе лазерной абляции очень важными становятся кинетические коэффициенты, определяющие передачу тепла от электронной подсистемы к ионной, а также теплопроводность за счет электронов. Адекватный учет теплопроводности металла при различающихся температурах электронов и ионов как в твердой, так и жидкой фазах, является серьезной проблемой, важной для задач абляции металлов под действием лазерных импульсов короткой длительности. Температура электронов и профиль давления в объемных лазерных мишенях существенно зависят от распространения тепла вглубь мишени. В свою очередь, определяющий скорость распространения тепла коэффициент электронной теплопроводности сам зависит от электронной и ионной температур в двухтемпературной ситуации. Возникающие профили давления определяют в дальнейшем формирование ударных волн и волн разрежения в веществе мишени и всю картину лазерной абляции. В работах по проекту особое внимание было уделено благородным металлам (золоту, меди и серебру). В этих металлах при не слишком высоких ионных температурах малы частоты электрон-ионных столкновений. Поэтому в них наилучшим образом можно исследовать возрастающий с ростом электронной температуры вклад электрон-электронных столкновений в коэффициент теплопроводности металла. Для нахождения коэффициента теплопроводности металлов, а также удельного сопротивления в высокотемпературной области фазовой диаграммы в неравновесной двухтемпературной ситуации нами использованы два подхода. Во-первых, использовано приближение кинетического уравнения для кинетических коэффициентов, в котором учитываются как электрон-ионные, так и электрон-электронные столкновения вплоть до электронных температур порядка нескольких эВ. В исследуемых нами благородных металлах (золото, медь, серебро) для теплопроводности важны столкновения s- и p-электронов между собой, а также их столкновения с d-электронами. Проведены расчеты эффективных частот электрон-электронных столкновений (s-p- электронов проводимости между собой и электронов проводимости с d-электронами) для золота, меди и серебра путем нахождения из кинетических уравнений парциальных частот столкновений, зависящих от модуля волнового вектора электрона, и использовании их в интегралах по волновым векторам электронов в коэффициентах Онзагера для учета условия отсутствия электрического тока при теплопроводности. Получены

аналитические аппроксимации эффективных частот межэлектронных столкновений как функций электронной температуры и плотности исследуемых металлов. Из кривой холодного давления для золота, меди и серебра получена зависимость дебаевской температуры от плотности кристаллических фаз этих металлов, а с ней и зависимость частот электрон-фоонных столкновений от плотности и ионной температуры, а с использованием известных экспериментальных значений электропроводности этих металлов в жидкой фазе получены частоты электрон-ионных столкновений в жидкой фазе. Соответственно в зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [13].

Другим важным направлением в ходе выполнения работ по проекту было применение теории функционала плотности (DFT) и квантовой молекулярной динамики для исследования термодинамических и кинетических свойств металлов в двухтемпературном состоянии. Проведён расчёт электронного спектра, плотности электронных состояний, а также электронных термодинамических функций (внутренней энергии, электронной теплоемкости, электронного давления) с помощью DFT пакета VASP для золота и меди. Расчёт проведён для металлов с идеальной гцк решёткой с помощью метода присоединенных плоских волн для представления одноэлектронных волновых орбиталей. На основе результатов этого расчёта построены зависимости электронных давления и внутренней энергии от электронной температуры и плотности вещества в диапазоне плотности от 7.6 до 9.4 г/см³ медь, (19.4 - 22.7 г/см³ для золота) и электронной температуры до 55 000 К. При нахождении кинетических коэффициентов конденсированных сред, в частности, металлов, в двухтемпературном состоянии, созданном под действием ультракоротких лазерных импульсов, из первопринципных расчетов расчет электронного энергетического спектра металлов методом функционала плотности был дополнен методом квантовой молекулярной динамики в сочетании с теорией Кубо-Гринвуда кинетических коэффициентов. В соответствии с этим в рамках работ по проекту проведены расчеты с использованием методов линеаризованных присоединенных плоских волн и псевдопотенциала, а также в более общей постановке и без использования приближения псевдопотенциала, для нахождения спектра электронных состояний меди в неравновесной двухтемпературной ситуации. Проведена проверка сходимости всех параметров наших первопринципных расчетов. Рассчитанная плотность электронных состояний с учетом высокой температуры электронов на двухтемпературной стадии воздействия ультракороткого лазерного излучения на металлы была использована для нахождения в меди важнейшего для задач двухтемпературной гидродинамики кинетического коэффициента, определяющего скорость электрон-ионного теплообмена. Этот коэффициент был рассчитан в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. При температурах ионов выше дебаевской (характерных для наших задач) в твердой фазе металла он не зависит от ионной температуры. Расчет электронного спектра из первых принципов в псевдопотенциальном приближении при различном выборе псевдопотенциала и в более трудоемком подходе, строго учитывающем все атомные электроны без использования приближения псевдопотенциала, вместе с квантовой молекулярной динамикой для ионных конфигураций и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от электронной температуры и плотности. Результаты основанной на кинетическом уравнении модели для теплопроводности меди хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [10,21].

Экспериментально на Cr:F лазере с длиной волны света греющего импульса 1240 нм, пробного импульса 620 нм и теоретически рассмотрена абляция пленки из золота на стеклянной подложке. В проведенных экспериментах с помощью интерферометра Майкельсона нами получены значения

фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения при его взаимодействии с поверхностью пленки после облучения греющим импульсом лазера. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. В наших экспериментах обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени. Подробный анализ и интерпретация наблюдающихся в эксперименте изменений оптических параметров металла возможны только в сочетании с адекватной теоретической моделью и численными расчетами влияния воздействия ультракоротких лазерных импульсов на оптические свойства металлической мишени.

Для нахождения связи оптических параметров, определяемых из экспериментов, с внутренними параметрами металла в процессе изменения его состояния был проведен теоретический расчет гидродинамического движения пленки и ее термодинамического состояния с помощью разработанного нами гидродинамического кода. Толщина пленки составляла в эксперименте 500 нм, что существенно превосходит глубину прогрева пленки за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена. Поэтому при проведенном нами теоретическом расчете пленка рассматривалась как массивный образец. Система уравнений созданного нами гидродинамического кода была использована для нахождения распределения электронной и ионной температур на ранних стадиях взаимодействия образца золота с лазерным излучением длительности 80 фс. В этом гидродинамическом коде использованы полученные нами аналитические аппроксимирующие выражения для коэффициента электронной теплопроводности в зависимости от электронной и ионной температур и плотности вещества. Проведено исследование влияния другого важного в двухтемпературной ситуации коэффициента - величины коэффициента электрон-ионного теплообмена α (недостаточно хорошо определяемого как экспериментально, так и теоретически) на параметры вещества пленки. Кроме распределения температур электронов и ионов в процессе гидродинамического моделирования находилось временное развитие профилей электронного и ионного давлений и плотности вещества мишени, а также проводилось исследование зависимости этих профилей от скорости обмена энергией между электронами и ионами. Найденное распределение плотности на ранней стадии гидродинамического движения вещества образца показывает наличие резкой границы конденсированного вещества даже при поверхностной плотности энергии лазерного излучения (флюенса), достаточной для плавления приграничной области образца. С учетом этого обстоятельства было проведено теоретическое рассмотрение оптических свойств золота в двухтемпературном состоянии с применением френелевского приближения на границе раздела сред для коэффициента отражения и фазового сдвига пробного лазерного излучения. Используемые в этом приближении значения комплексной диэлектрической проницаемости вещества мишени учитывают как электрон-ионную, так и электрон-электронную релаксацию в благородных металлах, а также межзонные электронные переходы в них. Полученное в результате теоретического и численного расчета временное изменение диэлектрической проницаемости золота, вычисленной с использованием в ней рассчитанных нами электронных времен релаксации в процессе изменения двухтемпературного состояния золота, обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Такие скачки в диэлектрической проницаемости обусловлены плавлением твердого вещества вблизи границы мишени на стадии, соответствующей моменту, когда теплообмен между электронами и ионами еще не закончен. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в неравновесном двухтемпературном состоянии металла [13].

Продолжена работа по совершенствованию гидродинамических кодов, используемых нами при исследовании различных случаев абляции конденсированных тел под действием ультракоротких лазерных импульсов. Они уже дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как

жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества на начальной стадии взаимодействия твердых мишеней с лазерным излучением и на заключительной стадии лазерной абляции при рекристаллизации полученного в результате лазерного воздействия расплава металла. Разработанные нами одномерные гидродинамические коды как в плоской геометрии, так и при цилиндрической и сферической симметрии, позволяют рассматривать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат. В качестве субстрата для металлических пленок в экспериментах, проводимых нами и другими научными группами, используется стекло. Соответственно твердый субстрат с характерными для стекол термодинамическими и кинетическими характеристиками используется в разработанных и применяемых нами для теоретического решения задач абляции и наноструктурирования металлов на подложке гидродинамических кодах. При этом характерной особенностью наших кодов является учет в них двухтемпературного состояния вещества металлической лазерной мишени, возникающего в результате ультракороткого лазерного воздействия. Такое состояние возникает вследствие поглощения энергии лазерного излучения электронами металла и сравнительно медленной передачи энергии от электронов существенно более тяжелым ионам, особенно затрудненной у благородных металлов (медь и особенно серебро и золото) из-за большой массы их атомов. Именно исследованию благородных металлов, в том числе численно с помощью гидродинамических кодов, уделено наибольшее внимание в ходе осуществления работ по проекту. В двухтемпературном состоянии металлов в гидродинамические коды как для расчета объемных мишеней, так и для изучения пленок металлов, включены двухтемпературные термодинамические функции, такие как внутренняя энергия, электронная и ионная теплоемкости, электронное и ионное давление. Также в эти коды включены кинетические характеристики металла в двухтемпературном состоянии, определяющие перенос тепла в нем. Это коэффициент электрон-ионного теплообмена, определяющий скорость передачи тепла от электронов ионам и коэффициент электронной теплопроводности. Кроме того, в созданные нами гидродинамические коды включается критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, и таким образом в работах по проекту уже в гидродинамическом приближении было проведено исследование разрушения как массивных образцов, так и пленок. Тем не менее, кинетика образования новых фаз, а это в наших задачах кавитация, плавление, кристаллизация расплава, лучше исследуется при молекулярно-динамическом моделировании, широко представленном в работах, выполненных по проекту. Но гидродинамическое моделирование является в наших работах существенно менее затратным по компьютерным ресурсам, чем молекулярно-динамическое моделирование, что является его несомненным преимуществом и позволяет широко использовать его в тех областях, где оно адекватно описывает круг происходящих явлений. При этом возможность решения одних и тех же задач в общей области применимости как гидродинамического приближения, так и молекулярно-динамического моделирования, служит одним из способов проверки адекватности подхода к расчетам и правильности результатов. В наших работах, в частности, гидродинамические расчеты использованы на начальной стадии лазерной абляции, при абляционных смещениях в направлении лазерного импульса, меньших поперечных размеров облученной области, при этом полученные в результате этих расчетов параметры вещества мишени, такие как температура, плотность, поле скоростей использовались далее как начальные параметры для более трудоемких молекулярно-динамических расчетов. [13,15,18,19,26].

Проведено гидродинамическое моделирование ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами, которая продолжается несколько первых пикосекунд после пиковой интенсивности импульса лазера. Внимание было сосредоточено на отличии в поведении мишеней из золота различной толщины: сверхтонких пленок с толщиной порядка глубины скин-слоя или меньше, тонких пленок с толщиной, в 4-7 раз превышающей глубину скин-слоя и объемных

мишеней (с толщиной, на порядок и более превышающих глубину скин-слоя). Показано, что это отличие определяется охлаждением первоначально нагретых в скин-слое электронов за счет электронной теплопроводности, передачей энергии от электронов ионам и, что важно, гидродинамикой разгрузки, вызванной повышенным электронным давлением. Когда толщина пленки оказывается больше глубины прогретого за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена слоя мишени, для золота составляющего 150-200 нм, термомеханическая абляция происходит из-за появления отрицательных напряжений и торможения расширяющегося вещества мишени за счет пространственной неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей ширины области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции, обусловленный быстрым падением полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления, первоначально сильно повышенного из-за поглощения электронами энергии лазерного импульса ультракороткой длительности. Электронное давление быстро уменьшается за счет большой величины электронной теплопроводности; как показывают наши расчеты, коэффициент электронной теплопроводности при температурах электронов, близких к 1 эВ, существенно превосходит привычные значения, соответствующие нормальным условиям. При этом охлаждение за счет теплопроводности нуждается в стоке энергии, который мал в случае пленок небольшой толщины или совсем отсутствует в случае сверхтонких пленок. Поэтому в случае сверхтонких пленок обсуждаемый нами механизм разрушения пленки отсутствует [15].

Экспериментально исследовано возбуждение ударных волн лазерными импульсами и их распространение в железе. Эксперименты проведены в сотрудничестве с Фемтосекундным лазерным центром ОИВТ РАН. Пленка железа была нанесена на стекло, греющий лазерный импульс длительности 200 фс падал на металлическую пленку, пройдя слой стекла, в то время как зондирующий луч падал на пленку со стороны свободной поверхности. В одном из экспериментов толщина пленки составляла 250 нм, в другом - 540 нм при толщине стекла 150 мкм. С помощью интерферометра Майкельсона была проведена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. Такая техника сверхбыстрой интерферометрической диагностики была применена для измерения смещений поверхности мишени с пространственным разрешением 1-2 нм и ее скорости после численного дифференцирования. В выполненных экспериментах нами найдено, что для обеих толщин пленки имеет место двухволновая структура волны сжатия, приходящей на заднюю поверхность пленки. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй выходящей на заднюю поверхность волны указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [23].

Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа. Для проведения такого моделирования был сконструирован новый многочастичный потенциал модели погруженного атома для межатомных взаимодействий в железе. Параметры потенциала и его функциональная форма были специально подобраны, чтобы воспроизводить в железе фазовый переход из объемно-центрированной кубической (оцк) решетки в гексагональную плотноупакованную (гпу) решетку (переход оцк-гпу). Толщина пленки при молекулярно-динамическом моделировании была взята такой же, как и в экспериментальных условиях. При моделировании пленка располагалась ориентированной относительно направления падающего лазерного излучения в трех кристаллографических направлениях: [100],[110],[111]. Молекулярно-динамическое моделирование было использовано для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе, не обнаруженного нами в процессе эксперимента с фемтосекундным лазером с флюенсом падающего на стекло излучения 4 Дж/см². В результате моделирования найдено, что распространение ударной волны в направлении [100] наиболее

благоприятно для фазового перехода из оцк фазы в гпу фазу. Проведенное моделирование показало, что в отличие от направления [100], ударные волны, распространяющиеся в направлениях [110] и [111], должны иметь существенно большую величину давления, чтобы иметь возможность вызвать такой структурный переход. В монокристаллической пленке, ориентированной в направлении [100], переход легко происходит уже в упругой ударной волне с давлением 20 ГПа. В то же время при ориентировке пленки в направлениях [110] и [111] фазовый переход оцк-гпу наблюдается на первых 100-200 нм от переднего по отношению к лазерному излучению края пленки, где давление в ослабевающей по мере распространения вглубь пленки ударной волне превышает 30 ГПа. Подобно тому, что наблюдалось в эксперименте, в молекулярно-динамическом моделировании мы также не обнаружили структурного перехода в ослабленной ударной волне на задней по отношению к падающему лазерному излучению стороне пленки после прохождения ударной волной значительной в наших условиях толщины пленки 540 нм. Структурный переход оцк-гпу имеет место на ранней стадии распространения волны, когда ударное давление достаточно для того, чтобы его вызвать. С помощью компьютерного моделирования проведено исследование обратного фазового перехода гпу-оцк и найдено, что такой переход инициируется в разгрузочной части ударной волны при давлении 13 ГПа и быстро завершается, когда давление падает до 8 ГПа [24].

В тесном сотрудничестве с группой ученых из ведущих научных центров Японии, США, Европы, среди которых Osaka University, Japan Synchrotron Radiation Research Institute, Synchrotron X-ray Station at SPring-8, RIKEN Spring-8 Center, Sayo, Hirishima University (Япония), University of Nevada (США), Universite Pierre et Marie Curie, Ecole Polytechnique (Франция) представлен эффективный косвенный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны, что позволяет вести мониторинг ее воспроизводимости при каждом лазерном выстреле. Этот метод основан на измерении рентгеновского излучения из абляционной плазмы фокусирующим спектрометром высокого разрешения. Оптический греющий лазер с энергией 1.0 Дж и длительностью импульса 660 пс был использован для облучения пленок твердых материалов различной толщины, содержащих кислород, алюминий, железо и тантал. Высокая чувствительность и разрешающая способность рентгеновского спектрометра позволяют получать спектры при каждом лазерном выстреле и контролировать флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%, что соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% в pump-probe экспериментах физики высоких плотностей энергии. При нано- субнаносекундной длительности лазерного импульса с относительно низкими интенсивностями излучения и для не слишком тяжелых химических элементов в составе мишени, у которых для стабильных изотопов отношение заряда ядер к массовому числу ~ 0.5 , электронная температура T оказывается связанной с интенсивностью лазерного излучения I соотношением $T \sim I^{2/3}$, что дает оценку интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать непрямую оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации дают нам возможность от выстрела к выстрелу с высокой точностью следить за воспроизводимостью силы ударных волн [22].

Все планируемые работы выполнены полностью: да

5.3. Основные результаты выполнения проекта (не более 10 стр.)

Исследуемые в рамках проекта РФФИ 14-19-01599 явления возникают при воздействии ультракоротких импульсов (УКЛИ) на вещество. Их исследование требует, во-первых, построения теоретических моделей из разных разделов физики от возбуждения электронов светом до

термодинамики, кинетики и гидродинамики конденсированных сред с учетом плавления и испарения и, во-вторых, искусственного численного моделирования. В соответствии с этими условиями подобран наш коллектив. Кроме того, необходим контакт с экспериментаторами и расчетчиками. Мы особенно плотно взаимодействовали с ОИВТ РАН (лаб. М.Б. Аграната, лаб. УрС К.В. Хищенко) и с группой проф. Kawachi из Kansai Photon Science Institute (KPSI), Japan Atomic Energy Agency (JAEA) по проекту РНФ, см. [3, 5, 8, 13, 22, 23, 26]. Это говорится здесь для того, чтобы подчеркнуть, решение каждой из заявленных проблем требует анализа ряда сопутствующих задач и поиска оптимальных путей, поскольку прямое численное решение не проходит (для него нужны слишком высокие параметры ЭВМ, которых нет на сегодня). Хороший пример связан с анализом процессов при воздействии УКЛИ на тонкую пленку металла, напыленного на подложку [2, 7, 9, 14-19, 24-27]. Данная проблема имеет широкий круг важных приложений.

В выполненных совместно с учеными из института Kansai Photon Science Institute (Япония) (группа проф. Кавачи) экспериментальных и теоретических исследованиях физических свойств твердых тел с сильно различающейся структурой электронных энергетических зон – от выраженных металлов до диэлектриков в состояниях с сильно возбужденной поглещением ультракоротких лазерных импульсов электронной подсистемой получены новые интересные результаты. Рассмотрен нагрев пикосекундным импульсом мягкого рентгеновского лазера (с длиной волны света 13.9 нм) электронной подсистемы металлов – алюминия и меди и диэлектрика с уникально большой шириной запрещенной зоны – фторида лития. В сочетании экспериментов по оценке нагрева электронной подсистемы по вспышке излучения от нагретой поверхности мишени и расчетов по двухтемпературной теории была выполнена оценка максимальной электронной температуры при флюенсах (поверхностной плотности энергии излучения), близких к порогу абляции (отрыву вещества от мишени). Из этих расчетов было получено, что в примененном диапазоне флюенсов температура электронов составляет не слишком большую величину величину около 1 эВ, обусловленную большой величиной диэлектрической щели в случае диэлектрика и возбуждением электронов из низколежащих зон в металлах, в отличие от температуры, получаемой при тех же значениях флюенса при воздействии на эти металлы ультракоротких импульсов лазерного излучения оптического диапазона частот [3,8].

Получены новые результаты при экспериментальном (в сотрудничестве с коллегами из Kansai Photon Science Institute) и теоретическом изучении распределения вещества мишени из золота при абляции под действием фемтосекундного излучения титан-сапфирового лазера оптического диапазона. В pump-probe экспериментах в качестве пробного луча использовалось излучение мягкого рентгеновского диапазона (энергия фотона 89 эВ, длина волны 13.9 нм). Использование рентгеновского света для диагностики имеет важные преимущества. Свет с такой длиной волны позволяет рассматривать интерференционную картину, в частности, получать кольца Ньютона при гораздо меньших смещениях поверхности лазерной мишени, чем для света оптического диапазона. С другой стороны, в отличие от пробного излучения оптического диапазона наблюдения за разлетом вещества мишени в рентгеновском диапазоне можно наблюдать не только на протяжении 1-10 нс, но и на более поздних временах (порядка мкс), потому что поглощение рентгеновских лучей пропорционально массе вещества на пути, пройденном лучами. Экспериментальные результаты были сравнены с результатами, полученными в гидродинамическом и молекулярно-динамическом моделировании. Рассчитанные асимптотические значения скорости отлетевшего от мишени жидкого слоя находятся в хорошем согласии с данными, полученными в экспериментах [5].

В работе, выполненной в сотрудничестве с группой ученых из ФРГ (Kaiserslautern University, Kassel University, Fritz Haber Institute of the Max Planck Society) изучен отклик простого металла (алюминия) на возбуждение дырок в 2p-электронных состояниях ультракоротким лазерным

импульсом мягкого рентгеновского диапазона. Проведен молекулярно-динамический расчет, учитывающий изменение потенциала межатомного взаимодействия с учетом многочастичных взаимодействий из-за возникновения дырок. Показано, что плавление твердого металла, нарушение его кристаллического порядка после возбуждения дырок по-прежнему определяется, в основном, электрон-фононной динамикой. Эффект изменения межатомного потенциала оказывается незначительным, он ограничен временем жизни дырки порядка 100 фс. Это время порядка обратной дебаевской частоты для колебаний кристаллической решетки [11].

В результате выполнения работ по проекту получены важные результаты при исследовании процессов, происходящих при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на тонкие пленки металлов, напыленных на подложку. При выполнении большого круга связанных с этим работ численно и экспериментально рассмотрен эффект воздействия импульсов титан-сапфирового лазера фемтосекундного диапазона длительности на 60-100 нм пленки золота, помещенные на стеклянный субстрат при флюенсе (поверхностной плотности энергии на мишени, превышающей порог абляции). В результате нами впервые обнаружено несколько различных режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от значения поглощенного флюенса и адгезионной прочности между пленкой и подложкой. Показано, что при слабой адгезии существует пороговое значение флюенса, при котором начинается отслоение пленки от подложки (порог отслоения), а также порог для начала разрушения пленки (порог абляции). Порог абляции выше порога отслоения. Выше порога отслоения пленка целиком отходит от подложки. Выше более высокого порога абляции в пленке возникает разрыв вблизи ее средней части, при этом внешняя половина пленки отделяется, а внутренняя остается на стеклянной подложке. Такая картина характерна для пленок из чистых золота и серебра на подложке из-за слабой адгезии при их контакте со стеклом. Обнаружено, что порог отслоения исчезает в случае сильной адгезии, в этом случае отслоение в целом становится невозможным. Разрыв пленки при превышении порога абляции остается. Экспериментально большая величина адгезии получена нами при помещении между золотом и стеклом промежуточного тонкого слоя хрома. Скорость пленки после того, как она отделяется от подложки, мала в диапазоне флюенсов, находящемся между двумя пороговыми значениями, потому что акустический импеданс стекла мал по сравнению с импедансом пленки из золота. Поэтому в ходе процесса отслоения абсолютные значения (положительные или отрицательные) давлений в области контакта металла и подложки в несколько раз меньше, чем абсолютная величина давления в золотой пленке. Однако выше порога абляции скорость внешней части пленки становится в несколько раз больше, потому что эта скорость не зависит от величины акустического импеданса подложки. Это обстоятельство объясняет, почему на поверхности мишени после лазерного воздействия появляются такие трехмерные структуры, как наноструи над выпуклостями нанометровых размеров в случае слабого сцепления. Скорость пленки при этом должна быть не слишком большой, чтобы позволить силам поверхностного натяжения и происходящей из-за отвода тепла кристаллизации расплавленной пленки остановить расширение выпуклости и предотвратить отрыв и удаление верхней ее части [26,27].

Получены важные результаты в ходе выполнения экспериментальных исследований гидродинамических течений, которые возникают в веществе лазерной мишени при воздействии на нее острорасфокусированным ультракоротким лазерным импульсом, проведенных при тесном сотрудничестве научных групп из ФИАНа, МИФИ, ИАПУ ДВО РАН, ДФУ, ВНИИА им. Н.Л. Духова, ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН. В ходе экспериментов по облучению фемтосекундными лазерными импульсами пленок серебра, нанесенных на стеклянную подложку, впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом высокого разрешения был применен химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС) с измерением интенсивности линий характеристического рентгеновского L-излучения

серебра и К-излучения кремния из подложки. Получены изображения в сканирующем микроскопе структур, образующихся на поверхности пленки. Многообразие форм полученных наноструктур, имеет большое практическое значение, в частности, для целей наноплазмоники [14].

Важные результаты получены при проведении теоретического исследования с молекулярно-динамическим моделированием проведенных нами экспериментов по изучению гидродинамических течений, возникающих в веществе мишени при действии на нее остросфокусированным ультракоротким лазерным импульсом. В ходе выполнения работ по проекту был разработан оригинальный учитывающий многочастичные взаимодействия в металлах в условиях одноосной деформации потенциал метода погруженного атома для золота. Решена проблема нехватки вычислительных ресурсов для описания всех стадий абляции, включающих поглощение излучения, нагрев пленки, ее плавление, движение расплава, его кристаллизацию и требующих напрямую рассмотрение области мишени, содержащей не менее 10^{11} атомов, что находится сейчас за пределами возможностей молекулярно-динамического подхода. Проблема решена сочетанием молекулярной динамики с менее затратным гидродинамическим подходом на ранней стадии и применением подобия в моделировании с двумя параметрами подобия. И это является важным полученным в ходе работ по проекту результатом, позволившим сократить число атомов в моделировании до достижимых $(2 \div 200) \cdot 10^6$ [16,17,26].

Применение методов подобия оказалось плодотворным и при рассмотрении развития индуцированных ударной волной выбросов с поверхности металла, имеющей микронного размера возмущения, характерные для лазерных воздействий, в форме микроскопических кумулятивных струй, генерируемых от такой поверхности. В условиях реального эксперимента очень трудно проследить за пространственно-временной эволюцией таких струй. Аналитическое описание их развития также затруднено из-за нелинейности задачи. Поэтому для изучения деталей образования струй был применен численный гидродинамический метод сглаженных частиц и молекулярно-динамическое моделирование. Размеры используемых в молекулярно-динамическом моделировании образцов сильно ограничены из-за ограниченности вычислительных ресурсов, но проведением масштабирования размеры реалистичных образцов можно достаточно хорошо моделировать доступным для расчета количеством атомов. Чтобы проверить возможности такого масштабирования, проведен сравнительный анализ расчетов по молекулярной динамике и гидродинамическому методу сглаженных частиц для олова. При молекулярно-динамических расчетах применен межатомный потенциал метода погруженного атома. Гидродинамическое моделирование выполняется для реальных экспериментальных размеров, в то время как для молекулярно-динамического используются пропорционально уменьшенные с учетом подобия. Получена детальная картина развития кумулятивных струй во времени и показано, что распределение скорости и массы вдоль струй, моделируемые в обоих подходах, находятся в хорошем согласии [4].

Получена картина образования наноструктур на пленке золота на диэлектрической подложке проведением молекулярно-динамического моделирования движения атомов с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и решеткой методом Монте-Карло. Чтобы использовать при моделировании образования наноструктур на поверхности мишени достижимое в расчетах число атомов, которое на несколько порядков меньше присутствующего в физически важной области мишени, использовалось гидродинамическое подобие с двумя безразмерными параметрами, совпадающими для реальной физической области задачи и для модельной системы с существенно меньшим числом атомов. Это позволило наблюдать формирование наноструктур на поверхности пленки золота в виде струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в

верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания оставшейся на мишени части в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части купола или, с возрастанием поглощенного флюенса и удалением верхней части купола, структуры в виде нанокороны с замерзшими по краям кратера в мишени остриями [18,19].

Получены важные результаты в области исследования электромагнитного излучения в наноструктурах. Впервые проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот, изготовленных воздействием одиночных ультракоротких импульсов лазерного излучения на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. Найдено, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра определяются размером нанопустот. Эти окрашенные геометрические резонансы были связаны нами с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод высокого порядка в нанопустотах, что показано с помощью комплексного вычислительного подхода, включающего в себя двухтемпературную гидродинамику металла пленки, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование распределения материала внутри нанопустот и электромагнитные расчеты, опирающиеся на полученные при таком моделировании формы нанопустот. Экспериментально обнаружено 6-кратное в среднем усиление сигнала фотolumинесценции от слоев комплексных солей алкилированного европия, внедренных в органическую матрицу, и молекул красителя родамина 6G (R6G) на пленке серебра. Кроме того, отдельные нанопустоты в серебре показывают пространственно усредненное усиление рамановского сигнала на R6G в $5 \cdot 10^4$ раз, а также зависящее от формы и размера усиление фотolumинесценции, достигающее до 13 раз для конкретных наноструктур. Созданная малозатратная эффективная методика изготовления нанополостей в благородных металлах может быть использована для окрашивания металлов, высокопроизводительной и дешевой печати субстратов для плазмоники, Представленная в результате выполнения работ по проекту высокорентабельная лазерная печать на основе быстрого плавления, деформации и повторного затвердевания тонких пленок благородных металлов дает хорошо контролируемый способ создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости с очень гладкими стенками, Он представляется значительно более выгодным и эффективным по сравнению с другими способами их изготовления, например, на основе осаждения металла на нанотекстурированный шаблон [20].

Важные результаты получены в исследовании внутренних свойств металлов в имеющей большое значение при взаимодействии ультракоротких лазерных импульсов с веществом в двухтемпературной области. В приближении кинетического уравнения получен коэффициент теплопроводности металлов в неравновесной двухтемпературной ситуации, в котором учитываются как электрон-ионные, так и электрон-электронные столкновения вплоть до электронных температур порядка нескольких эВ. Получены эффективные частоты электрон-электронных столкновений (s-p- электронов проводимости между собой и электронов проводимости с d-электронами) для золота, меди и серебра и аналитические аппроксимации эффективных частот межэлектронных столкновений как функций электронной температуры и плотности исследуемых металлов. Получена зависимость частот электрон-фононных столкновений от плотности и ионной температуры. В зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [13].

Получены кинетические коэффициенты меди в двухтемпературном состоянии, созданном под действием ультракоротких лазерных импульсов, проведением первопринципных расчетов

методом функционала плотности для электронной энергетической зонной структуры и методом квантовой молекулярной динамики в сочетании с теорией Кубо-Гринвуда. Рассчитанная плотность электронных состояний на двухтемпературной стадии была использована для нахождения в меди коэффициента электрон-ионного теплообмена в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. Расчет электронного спектра из первых принципов в псевдопотенциальном приближении при различном выборе псевдопотенциала и в более трудоемком подходе, учитывающем все атомные электроны без использования приближения псевдопотенциала, вместе с квантовой молекулярной динамикой для учета движения ионов и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от температуры электронов и плотности. Результаты основанной на кинетическом уравнении модели для теплопроводности меди хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [21].

Выполнены экспериментальные исследования абляции пленки из золота на стеклянной подложке под действием фемтосекундного излучения Cr:F лазера. В экспериментах, проведенных совместно с сотрудниками ОИВТ РАН, с помощью интерферометра Майкельсона получены значения фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения на пленке. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. Обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени [13].

Проведен теоретический расчет гидродинамического движения пленки и ее термодинамического состояния с помощью разработанного нами гидродинамического кода. Система уравнений созданного нами гидродинамического кода была использована для нахождения распределения электронной и ионной температур и плотности на ранних стадиях взаимодействия образца золота с лазерным излучением длительности 80 фс. С учетом этих параметров вещества мишени проведено теоретическое рассмотрение оптических свойств золота в двухтемпературном состоянии с применением френелевского приближения на границе раздела сред для коэффициента отражения и фазового сдвига пробного лазерного излучения. Полученное в результате теоретического и численного расчета временное изменение диэлектрической проницаемости золота, вычисленной с использованием в ней рассчитанных нами электронных времен релаксации в процессе изменения двухтемпературного состояния золота, обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Такие скачки в диэлектрической проницаемости обусловлены плавлением твердого вещества вблизи границы мишени на стадии, соответствующей моменту, когда теплообмен между электронами и ионами еще не закончен. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в неравновесном двухтемпературном состоянии металла [13].

Важным результатом, полученным в ходе работ по проекту, явилось создание и совершенствование уже созданных нами гидродинамических кодов, используемых при исследовании различных случаев абляции конденсированных тел под действием ультракоротких лазерных импульсов. Они уже дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества на начальной стадии взаимодействия твердых мишеней с лазерным излучением и на заключительной стадии лазерной абляции при рекристаллизации полученного в результате лазерного воздействия расплава металла. Разработанные нами одномерные гидродинамические программы позволяют рассматривать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат. Характерной особенностью наших кодов является учет в них двухтемпературного состояния вещества металлической лазерной мишени, возникающего в результате ультракороткого лазерного воздействия. Это и

двухтемпературные термодинамические функции, такие, как внутренняя энергия, теплоемкость, давление, и кинетические коэффициенты, определяющие обмен энергией между электронами и ионами, и электронную теплопроводность. Кроме того, в созданные нами гидродинамические коды включается критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, что позволило в работах по проекту уже в гидродинамическом приближении провести исследование разрушения как массивных образцов, так и пленок [13,15,18,19,26].

Выявлен новый механизм разрушения пленок металлов при проведении гидродинамического моделирование ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами, которая продолжается несколько первых пикосекунд после пиковой интенсивности импульса лазера. Внимание было сосредоточено на отличии в поведении мишеней из золота различной толщины: сверхтонких пленок с толщиной порядка глубины скин-слоя или меньше, тонких пленок с толщиной, в 4-7 раз превышающей глубину скин-слоя и объемных мишеней (с толщиной, на порядок и более превышающих глубину скин-слоя). Когда толщина пленки оказывается больше глубины прогретого за счет электронной теплопроводности и электрон-ионного теплообмена слоя мишени, для золота составляющего 150-200 нм, термомеханическая абляция происходит из-за появления отрицательных напряжений и торможения расширяющегося вещества мишени за счет пространственной неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей ширины области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции, обусловленный быстрым падением полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления, первоначально сильно повышенного из-за поглощения электронами энергии лазерного импульса ультракороткой длительности. Электронное давление быстро уменьшается за счет большой величины электронной теплопроводности. В случае сверхтонких пленок выявленный нами механизм разрушения пленки отсутствует [15].

Получены важные результаты при экспериментальном исследовании возбуждения ударных волн фемтосекундными лазерными импульсами оптического диапазона частот и их распространение в железе. Эксперименты проведены в сотрудничестве с Фемтосекундным лазерным центром ОИВТ РАН. Пленка железа была нанесена на стекло, греющий лазерный импульс длительности 200 фс падал на металлическую пленку, пройдя слой стекла, в то время как зондирующий луч падал на пленку со стороны свободной поверхности. С помощью интерферометра Майкельсона была проведена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. В выполненных экспериментах нами найдено, что для обеих толщин пленки имеет место двухволновая структура волны сжатия, приходящей на заднюю поверхность пленки. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй выходящей на заднюю поверхность волны указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [23].

Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа и получены важные результаты. Параметры межчастичного потенциала при моделировании и его функциональная форма были специально подобраны, чтобы воспроизводить в железе фазовый переход из объемно-центрированной кубической (оцк) решетки в гексагональную плотноупакованную (гпу) решетку (переход оцк-гпу). Толщина пленки при молекулярно-динамическом моделировании была взята такой же, как и в экспериментальных условиях. Молекулярно-динамическое моделирование было использовано для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе. В результате моделирования найдено, что распространение ударной волны в направлении [100] наиболее благоприятно для фазового перехода из оцк фазы в гпу фазу. Проведенное моделирование показало, что в отличие от

направления [100], ударные волны, распространяющиеся в направлениях [110] и [111], должны иметь существенно большую величину давления, чтобы иметь возможность вызвать такой структурный переход. Структурный переход оцк-пу имеет место на ранней стадии распространения волны, когда ударное давление достаточно для того, чтобы его вызвать. [24].

Представлен новый эффективный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны, позволяющий вести мониторинг ее воспроизводимости при каждом лазерном выстреле. Предложенный нами метод основывается на измерении рентгеновского излучения, исходящего из абляционной плазмы, фокусирующим спектрометром высокого разрешения. В проведенных экспериментах оптическим греющим лазером с энергией 1.0 Дж и длительностью импульса 660 пс облучались пленки твердых материалов различной толщины, содержащих кислород, алюминий, железо и тантал. Высокая чувствительность и разрешающая способность рентгеновского спектрометра позволили получать спектры при каждом лазерном выстреле и при этом контролировать флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%. Это соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% и интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, определяемой с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать непрямую оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации дают нам возможность от выстрела к выстрелу следить за воспроизводимостью силы ударных волн с высокой точностью [22].

Все запланированные научные результаты достигнуты: да

5.4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов (в том числе степень выполнения проекта) для публикации на сайте РФФ

на русском языке (до 3 страниц текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту)

В выполненных совместно с учеными из института Kansai Photon Science Institute (Япония) (группа проф. Кавачи) экспериментальных и теоретических исследованиях рассмотрен нагрев пикосекундным импульсом мягкого рентгеновского лазера электронной подсистемы металлов – алюминия, меди и диэлектрика – фторида лития. В сочетании экспериментов по оценке нагрева электронной подсистемы по вспышке излучения от нагретой поверхности мишени и расчетов по двухтемпературной теории была выполнена оценка максимальной электронной температуры при флюенсах (поверхностной плотности энергии излучения), близких к порогу абляции (отрыву вещества от мишени), составившая величину около 1 эВ [3,8].

Получены новые результаты при экспериментальном (в сотрудничестве с коллегами из Kansai Photon Science Institute) и теоретическом изучении распределения вещества мишени из золота при абляции под действием фемтосекундного оптического лазера. В pump-probe экспериментах е пробный луч был мягкого рентгеновского диапазона, что дает ряд преимуществ перед светом оптического диапазона. Оно позволяет рассматривать интерференционную картину, в частности, кольца Ньютона, при гораздо меньших смещениях поверхности лазерной мишени, и разлет вещества мишени в рентгеновском диапазоне можно наблюдать на более поздних временах (порядка мкс). Рассчитанные и экспериментальные асимптотические значения скорости отлетевшего от мишени жидкого слоя находятся в хорошем согласии [5].

В работе, выполненной в сотрудничестве с группой ученых из ФРГ (Kaiserslautern University, Kassel University, Fritz Haber Institute of the Max Planck Society) изучен отклик алюминия на возбуждение дырок в 2p-электронных состояниях ультракоротким лазерным импульсом мягкого рентгена. Проведен молекулярно-динамический расчет, учитывающий изменение потенциала

межатомного взаимодействия из-за возникновения дырок. Показано, что плавление твердого металла, нарушение его кристаллического порядка после возбуждения дырок по-прежнему определяется, в основном, электрон-фононной динамикой. Эффект изменения межатомного потенциала оказывается малым, он ограничен временем жизни дырки порядка 100 фс. Это время порядка обратной дебаевской частоты.[11].

Исследованы процессы, происходящие при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на тонкие пленки металлов на стеклянной подложке. Численно и экспериментально рассмотрено действие фемтосекундных импульсов на пленки золота в зависимости от флюенса (поверхностной плотности энергии на мишени). Впервые найдено несколько режимов абляции и формирования трехмерных структур, зависящих от поглощенного флюенса и величины адгезии между пленкой и подложкой. При слабой адгезии обнаружено пороговое значение флюенса для начала отслоения пленки от подложки (порог отслоения) и более высокий порог начала разрушения пленки (порог абляции). Выше порога отслоения пленка целиком отходит от подложки. Выше порога абляции пленка разрывается примерно посередине. Порог отслоения исчезает в случае сильной адгезии, в этом случае расслоение в целом становится невозможным. [26,27].

Проведено экспериментальное изучение гидродинамических течений в пленках серебра на стекле при действии остросфокусированного ультракороткого лазерного импульса. Впервые для визуализации воздействия излучения на мишень наряду со сканирующим электронным микроскопом применен химический анализ лазерно-модифицированных пленок методом микроспектроскопии характеристической энергодисперсионной рентгеновской флуоресценции (ЭДРС) для L-линий рентгеновского излучения серебра и K-линий кремния из подложки. В сканирующем микроскопе получены изображения структур на поверхности пленки, имеющих большое практическое значение, в частности, для нанолазмоники [14].

Сочетанием гидродинамического подхода на ранней стадии и применением подобия в моделировании решена проблема нехватки вычислительных ресурсов при прямом молекулярно-динамическом моделировании проведенных нами экспериментов по изучению гидродинамических течений в мишени под действием остросфокусированных ультракоротких лазерных импульсов. Проведено молекулярно-динамическое моделирование разлета пленки из золота на стеклянной подложке и образования наноструктур, требующее при расчете напрямую не менее 10^{11} атомов, и выполненное в наших расчетах на несколько порядков меньшим ($(2-200) \cdot 10^6$) числом атомов [18,19].

Применение методов подобия оказалось плодотворным и при рассмотрении развития индуцированных ударной волной выбросов с поверхности металла, имеющей микронные возмущения, характерные для лазерных воздействий. Для изучения деталей образования струй был применен численный гидродинамический метод сглаженных частиц и молекулярно-динамическое моделирование. Гидродинамическое моделирование выполняется для реальных экспериментальных размеров, в то время как для молекулярно-динамического используются пропорционально уменьшенные с учетом подобия. Получена детальная картина развития кумулятивных струй выброса вещества во времени и показано, что распределение скорости и массы вдоль струй, моделируемые в обоих подходах, находятся в хорошем согласии [4].

Проведено гидродинамическое моделирование на начальной стадии абляции пленки золота на подложке и молекулярно-динамическое моделирование движения атомов на более поздней стадии с добавлением электронной компоненты для учета электронной теплопроводности и обмена энергией между электронами и ионами методом Монте-Карло. Чтобы использовать при моделировании достижимое в расчетах число атомов, использовались соображения подобия. Это позволило наблюдать наноструктуры на поверхности пленки золота в виде струй на поверхности жидкого купола, их разрушения на капли в верхней части из-за сил поверхностного натяжения и замерзания в виде твердого купола с сильно вытянутым острием в верхней части или структуры в виде нанокороны [16,17,25].

Впервые проведено изучение резонансного рассеяния света от индивидуальных нанопустот,

полученных воздействием ультракоротких лазерных импульсов на пленки благородных металлов на стеклянной подложке, используя конфокальную микроспектроскопию темного поля. С помощью вычислительного подхода с двухтемпературной гидродинамикой металла пленки, молекулярно-динамическим и Монте-Карло моделированием вещества внутри нанопустот и опирающимися на это моделирование электромагнитными расчетами показано, что спектральные положения пиков резонансного рассеяния в видимой области спектра определяются размером нанопустот и связаны с возбуждением и эффективным рассеянием поперечных плазмонных мод в нанопустотах. Представлен эффективный высокорентабельный способ лазерной печати путем создания отдельных нанопустот и их упорядоченных массивов большой емкости [20].

Исследованы внутренние свойства металлов в неравновесной двухтемпературной области. Получены эффективные частоты электрон-электронных и электрон-фононных столкновений для золота, меди и серебра, их аналитические аппроксимации как функции электронной и ионной температур и плотности металлов. В зависимости от электронной, ионной температур и плотности золота, меди и серебра в приближении кинетического уравнения проведен расчет коэффициента электронной теплопроводности и получены удобные в использовании выражения для коэффициента электронной теплопроводности в твердой и жидкой фазах этих металлов [13].

Электронный энергетический спектр меди рассчитан в двухтемпературном состоянии методом функционала плотности и использован для нахождения в меди коэффициента электрон-ионного теплообмена в зависимости от электронной температуры и плотности вещества. Расчет электронного спектра из первых принципов вместе с квантовой молекулярной динамикой для учета движения ионов и теорией Кубо-Гринвуда был использован для нахождения электронного коэффициента теплопроводности меди в зависимости от температуры электронов и плотности. Результаты, основанные на использовании кинетического уравнения, хорошо согласуются с данными, полученными с помощью теории Кубо-Гринвуда [21].

Проведены экспериментальные исследования абляции пленки из золота на стеклянной подложке под действием фемтосекундных импульсов Cr:F лазера. В экспериментах, проведенных совместно с сотрудниками ОИВТ РАН, получены значения фазового сдвига и коэффициента отражения пробного лазерного излучения на пленке. С помощью этих двух параметров проведено восстановление вытекающей из результатов экспериментов комплексной диэлектрической проницаемости и комплексного показателя преломления. Обнаружены скачки в изменении диэлектрической проницаемости во времени [13].

Проведен теоретический расчет гидродинамического движения пленки золота и ее термодинамического состояния и теоретическое рассмотрение оптических констант золота в двухтемпературном состоянии. В комплексной диэлектрической проницаемости учитываются электрон-ионная и электрон-электронная релаксация и межзонные электронные переходы. Полученное в теоретическом расчете временное изменение диэлектрической проницаемости обнаруживает немонотонное поведение и скачки, аналогичные полученным в проведенной экспериментальной работе. Таким образом, развитая нами модель позволяет отслеживать фазовые переходы в двухтемпературном состоянии металла [13].

Проведена большая работа по созданию и совершенствованию гидродинамических кодов, используемых при исследовании лазерной абляции. Они дают возможность рассмотрения в качестве мишеней как жидкостей, так и твердых тел, с учетом сдвиговых напряжений в твердой фазе вещества, позволяют исследовать как объемные мишени, так и тонкие пленки, находящиеся либо в свободном состоянии, либо помещенные на субстрат, учитывают двухтемпературное состояние металлической лазерной мишени и содержат критерий образования паровой фазы, кавитации жидкости при ее растяжении в процессе лазерной абляции, что позволило уже в гидродинамическом приближении провести исследование разрушения мишеней [13,15,18,19,26].

Новый механизм разрушения пленок металлов на ранней стадии абляции фемтосекундными лазерными импульсами выявлен при гидродинамическом моделировании абляции пленок из золота. При толщине пленки, большей глубины прогреваемого электронно-теплопроводностью и

электрон-ионным теплообменом слоя мишени, термомеханическая абляция происходит из-за отрицательных напряжений и торможения вещества мишени за счет неоднородности области нагрева. При толщине пленки, меньшей области прогрева в массивном образце, возникает дополнительный механизм абляции из-за быстрого падения полного давления в первые 2-3 пс за счет сильного уменьшения электронного давления электронной теплопроводностью. [15].

Проведено экспериментальное исследование возбуждения ударных волн лазерными импульсами и их распространение в железной пленке на подложке. С помощью интерферометра Майкельсона выполнена диагностика движения задней свободной поверхности пленки. Найдено, что имеет место двухволновая структура приходящей на нее волны сжатия. Измеренная большая скорость первой волны соответствует метастабильной упругой ударной волне, в то время как меньшая скорость второй волны указывает на следующую за ней пластическую ударную волну [23].

Наряду с поставленными экспериментами было проведено молекулярно-динамическое моделирование распространения индуцированных лазерным излучением ударных волн в свободной пленке железа для определения условий наблюдения полиморфного перехода в железе. Найдено, что распространение ударной волны в кристаллографическом направлении [100] наиболее благоприятно для перехода из оцк в гпу фазу, а ударные волны в направлениях [110] и [111] для перехода должны иметь существенно большую величину давления [24].

Представлен новый эффективный метод оценки силы создаваемой лазером в мишени ударной волны, позволяющий вести ее мониторинг, основанный на измерении рентгеновского излучения из абляционной плазмы спектрометром высокого разрешения, контролирующим флуктуации спектральной интенсивности с точностью до 2%, что соответствует точности определения температуры электронов плазмы 5%-7% и интенсивности лазерного излучения, поглощенного мишенью, с точностью 8%-10%. Таким образом, измерение электронной температуры в плазме позволяет сделать оценку потока лазерной энергии на мишень, а ее флуктуации - следить за воспроизводимостью силы ударных волн [22].

на английском языке

In experimental and theoretical studies completed jointly with scientists from the Institute of Kansai Photon Science Institute (Japan) (Professor Kawachi group) heating of the electronic subsystem of metals - aluminum, copper, and dielectric - lithium fluoride by the picosecond pulse of the soft X-ray laser has been considered. In combination of experiments with the assessment of the heating of the electron subsystem by bursts of radiation from the heated surface of the target and calculation within the two-temperature theory the estimation of the maximum electron temperature at fluences (surface radiation energy density), close to the threshold of ablation (separation of material from the target), was made. This temperature is about 1 eV [3,8].

New results in the experimental (in collaboration with colleagues from Kansai Photon Science Institute) and a theoretical study of the distribution of the matter of gold target during the ablation by femtosecond optical laser are obtained. In the pump-probe experiments, the probe soft X-ray beam was used, which offers a number of advantages over optically visible light range. It allows us to consider the interference pattern, such as Newton rings, at much smaller displacements of the laser target surface, and the target matter expansion via X-rays can be observed at later times (of the order of microseconds). The calculated and experimental asymptotic values of the velocity of spalled from the target liquid layer are in good agreement [5].

In the work carried out in collaboration with a team of scientists from Germany (Kaiserslautern University, Kassel University, Fritz Haber Institute of the Max Planck Society) response of aluminum to the excitation of holes in the 2p-electron states by ultrashort laser pulse of soft x-rays has been studied. A molecular

dynamic calculation, taking into account the change in the potential of interatomic interaction due to the occurrence of holes, has been carried out. It was shown that the melting of the solid metal, a violation of its crystalline order after excitation of holes is still mainly determined by the electron-phonon dynamics. Effect of the change of interatomic potential is small, it is limited to the hole life time of about 100 fs. This time is of the order of the reverse Debye frequency. [11].

The processes taking place under the action of ultrashort laser pulses onto the thin metal films on a glass substrate are investigated. The action of femtosecond pulses onto the gold films in dependence on the fluence (energy density on the surface of the target) is considered numerically and experimentally. For the first time several modes of ablation and formation of three-dimensional structures, depending on the absorbed fluence and values of adhesion between the film and the substrate, are found. In the case of poor adhesion the threshold fluence value for the beginning of the film delamination from the substrate (delamination threshold) and a higher threshold for the onset of the film destruction (ablation threshold) are discovered. Above the delamination threshold, the entire film departs from the substrate. Above the ablation threshold the film is broken somewhere in its middle part. Delamination threshold disappears in the case of strong adhesion, in this case the departure as a whole becomes impossible [26,27].

An experimental study of hydrodynamic flows in the films of silver on the glass under the action of sharply focused ultrashort laser pulse is carried out. First for imaging of results of laser action onto the target a chemical analysis of a laser-modified films by the characteristic energy dispersive X-ray fluorescence microspectroscopy (EDRS) for the L-lines of silver and K-lines of silicon from the substrate was applied along with a scanning electron microscope. Images of structures on the film surface of great practical importance, in particular for nanoplasmonics, are obtained in the scanning microscope [14].

By combining the hydrodynamic approach at an early stage and the application of the scaling in the molecular dynamics simulation we solved the problem of lack of computing resources in direct molecular dynamics simulations of carried by us experiments to study the hydrodynamic flows in the target under the action of sharply focused ultrashort laser pulses. A molecular dynamics simulation of the expansion of the film of gold on a glass substrate and nanostructure formation requiring in the direct calculation no less than 10^{11} atoms, is performed in our calculations with the use of several orders of magnitude smaller $((2 \div 200) \cdot 10^6)$ atoms [18,19].

Application of similarity methods proved fruitful in the consideration of the induced shock wave emissions from the metal surface, having a micron disturbances, characteristic for laser action. To study the details of formation of jets a numerical smoothed particle hydrodynamics method and molecular dynamics simulation was applied. Hydrodynamic simulation is performed for real experimental domain, while for molecular dynamics proportionally reduced dimensions are used with taking into account the similarity. A detailed picture of the temporal development of cumulative jets eject is obtained and it is shown that the speed and mass distribution along the jet, modeled in both approaches, are in a good agreement [4].

A hydrodynamic modeling of the initial stage of the ablation of gold film on a substrate and molecular dynamics simulation of the motion of atoms at a later stage with the addition of electronic components to account for electron thermal conductivity and energy exchange between the electrons and the lattice by the Monte Carlo method. To use in modeling achievable in the calculation number of atoms similarity considerations were used. It was possible to observe the nanostructures on the surface of the gold film in the form of jets on the surface of the liquid dome, their destruction on drops in the upper part due to the surface tension, and freezing as a solid dome with very elongated edge in the upper part or structure as nanodiadem [16 17,25].

For the first time the resonance scattering of light by individual nanovoids received under the action of

ultrashort laser pulses on noble metal films on a glass substrate is studied by using a dark field confocal microspectroscopy. Using computational approach with a two-temperature hydrodynamics of the metal film, molecular dynamics and Monte Carlo simulation of substance inside nanovoids and electromagnetic calculations build on this simulations, it is shown that the spectral positions of the resonance scattering peaks in the visible region of the spectrum are determined by the size of nanovoids and related to excitation and interference of the transverse plasmon modes in nanovoids. An effective highly profitable way of laser printing by creating separate nanovoids and their ordered arrays of large capacity is supposed [20].

We investigated the intrinsic properties of metals in non-equilibrium two-temperature state. Effective frequencies of electron-electron and electron-phonon collisions for gold, copper and silver, their analytical approximations as a function of the electron and ion temperatures and density of metals. We calculated the coefficient of electronic thermal conductivity of gold, copper and silver in the kinetic equation approximation depending on the electron, ion temperatures and density and obtained convenient to use expressions for him in the solid and liquid phases of these metals [13].

The electron energy spectrum of copper is calculated at two-temperature state by the methods of density functional theory and used to obtain the electron-ion coupling parameter in copper depending on the electron temperature and density of matter. The calculation of the electron spectrum from first principles together with the quantum molecular dynamics to account for the motion of the ions and the theory of Kubo-Greenwood was used to find electron thermal conductivity of copper as a function of the electron temperature and density. The results, based on the use of the kinetic equation, are in a good agreement with those obtained using the Kubo-Greenwood theory [21].

Experimental studies of ablation of gold film on a glass substrate under the action of femtosecond Cr: F laser are made. In experiments carried out in collaboration with the scientists of JIHT RAS, the phase

shift and the reflection coefficient of the probe laser beam on the film are obtained. With these two parameters recovery of the complex permittivity and the complex refractive index resulting from the experimental data is carried out. Jumps in the temporal evolution of the permittivity are detected[13].

A theoretical calculation of the hydrodynamic motion of the gold film and its thermodynamic state and theoretical consideration of the optical constants of gold in the two-temperature condition are carried out. electron-ion and electron-electron relaxation and interband electronic transitions are taken into account in the complex permittivity. Theoretical calculation of the temporary change of the dielectric constant detects non-monotonic behavior and jumps, similar to those obtained in the experimental work. Thus, a developed model lets you track phase transitions in two-temperature state of the metal [13].

A great deal of work on the creation and improvement of hydrodynamic codes used in the investigation of laser ablation has been done. They enable consideration as targets of both liquids and solids, with the shear stress in the solid phase, allow to study both the bulk targets and thin films either in the free state, or placed on a substrate. They consider the two-temperature state of the metal laser target and contain vapor formation, cavitation in a fluid criterion during its stretching in a laser ablation, which allows to conduct a study of destruction of targets in the hydrodynamic approximation [13,15,18,19,26].

New mechanism of destruction of metal films at an early stage of the ablation by femtosecond laser pulses is detected in simulation of gold films ablation. When the film thickness is greater than the depth of the layer, heated by the electronic conductivity and ion-electron energy exchange, thermomechanical ablation occurs because of the negative pressure and the braking of the target material by heated domain inhomogeneity. When the film thickness is less than the heated range in a bulk sample, there is an

additional mechanism of ablation due to the rapid drop of the total pressure during the first 2-3 ps due to the strong decrease of electron pressure because of the electron thermal conductivity [15].

An experimental investigation of the excitation of shock waves by laser pulses and their propagation in the iron film on the substrate is carried out. With the help of a Michelson interferometer diagnostics of the motion of free rear surface of the film movement. We found that there is a two-wave structure of coming onto the rear surface compression wave. The measured high velocity of the first wave corresponds to a metastable elastic shock wave, while the second wave of lower velocity refers to the next following plastic shock wave [23].

Together with the conducted experiments molecular dynamics simulation of laser-induced shock wave propagation in the free iron film was carried out to determine the conditions of observation of the polymorphic transition in iron. We found that the propagation of a shock wave in the crystallographic direction [100] is most favorable for the transition from bcc to hcp phase, and the shock waves along the [110] and [111] should be a substantially larger amount of pressure for this transition [24].

A new effective method of estimation of the power of a shock wave generated by the laser in a target, is presented. It allows to conduct monitoring of the shock wave power, based on X-ray radiation measurements from the ablation plasma by the spectrometer with high resolution, controlling fluctuations in the spectral intensity with the accuracy up to 2%, which corresponds to the accuracy of the determination of the plasma electron temperature of 5% - 7% and the intensity of the laser radiation absorbed by the target with an accuracy of 8% -10%. Thus, the measurement of the electron temperature in the plasma allows us to estimate the laser energy flux to the target, and its fluctuations allows to monitor the reproducibility of the power of shock waves [22].

5.5. Перечень публикаций по проекту за весь срок выполнения проекта (заполняется автоматически на основании форм 2о)

1. Иногамов Н. А., Жаховский В. В., Хохлов В. А. (Inogamov N.A., Zhakhovskii V.V., Khokhlov V.A.)

Струеобразование при отрыве металлической пленки от подложки в результате воздействия фемтосекундного лазерного импульса Журнал экспериментальной и теоретической физики (2014 г.)

2. Иногамов Н. А., Жаховский, В. В. (Inogamov N. A. and Zhakhovskii V. V.) **Формирование наноразмерных струек и капель ультракоротким лазерным импульсом при фокусировке на дифракционном пределе** Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики (2014 г.)

3. Ишино М., Хасегава Н., Нишикино М. Пикуз Т., Скобелев И., Фаенов А., Иногамов Н., Кавачи Т., Ямагиwa М. (Ishino M., Hasegawa N., Nishikino M., Pikuz T., Skobelev I., Faenov A., Inogamov N., Kawachi T., Yamagiwa M.) **Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser pulses** Journal of Applied Physics (2014 г.)

4. Дьячков С.А., Паршиков А.Н., Жаховский В.В. (S. A. Dyachkov, A. N. Parshikov, V. V. Zhakhovsky) **Shock-produced ejecta from Tin: comparative study by molecular dynamics and smoothed particle hydrodynamics methods** Journal of Physics: Conference Series (2015 г.)

5. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хасегава Н., Нишикино М., Ямагиwa М., Ишино М., Агранат М.Б., Ашитков С.И., Фаенов А.Я. и др. (Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Hasegawa N., Nishikino M., Yamagiwa M., Ishino M., Agranat M.B., Ashitkov S.I., Faenov A. Ya. et.al) **Hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse: simulations and the optical pump—X-ray probe experiment** Applied Physics B (2015 г.)

6. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. (N.A. Inogamov, V. V. Zhakhovsky, V. A. Khokhlov) **Three Dimensional Ablation Flow Produced by Ultrashort Laser Pulse from Perfectly Flat Target**

-
7. Иногамов, Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Анисимов С.И. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P. & Anisimov, S. I.) **RAPID NON-EQUILIBRIUM CRYSTALLIZATION OF FLYING MOLTEN THIN SHELL CREATED BY FEMTOSECOND LASER ACTION** Scientific-Coordination Workshop on Non-Ideal Plasma Physics November 27–28, 2015, Moscow, Russia Book of Abstracts (2015 г.)
-
8. Ишино М., Хасегава М., Нишикино М., Пикуз Т., Скобелев И., Фаенов А., Иногамов Н., Кавачи Т., Ямагиwa М. (M. Ishino, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, I. Skobelev, A. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, M. Yamagiwa) **Low electron temperature in ablating materials formed by picosecond soft x-ray laser pulses** SPIE Proceedings (2015 г.)
-
9. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, В. А. Хохлов (Inogamov N.A., Zhakhovskii V.V., Khokhlov V.A.) **Струеобразование при отрыве металлической пленки от подложки в результате воздействия фемтосекундного лазерного импульса ЖЭТФ** (2015 г.)
-
10. Петров Ю.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (Yu. V. Petrov, K. P. Migdal, N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovsky) **Two-temperature equation of state for aluminum and gold with electrons excited by an ultrashort laser pulse** Applied Physics B (2015 г.)
-
11. Росанди И., Кабеер Ф.Ц., Чередников Я., Зийлуста Е.С., Гарсия М.Е., Иногамов Н.А., Урбасек Х.М. (Y. Rosandi, F. C. Kabeer, Y. Cherednikov, E. S. Zijlstra, M. E. Garcia, N. A. Inogamov, H. M. Urbassek) **Melting of Al Induced by Laser Excitation of 2p Holes** Materials Research Letters (2015 г.)
-
12. Хохлов В.А., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Ильницкий Д.К., Мигдал К.П., Шепелев В.В. (V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. V. Zhakhovsky, D. K. Ilitsky, K. P. Migdal and V.V. Shepelev) **Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation** Shock Compression of Condensed Matter (the Proceedings of the 19th Biennial APS Conference on Shock Compression of Condensed Matter) (2015 г.)
-
13. Ашитков С.И., Комаров П.С., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Хохлов В.А., Юркевич А.А., Ильницкий Д.К., Иногамов Н.А., Агрант М.Б. (Ashitkov, S. I.; Komarov, P. S.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Khokhlov, V. A.; Yurkevich, A. A.; Ilitsky, D. K.; Inogamov, N. A.; Agranat, M. B.) **Ablation of gold irradiated by femtosecond laser pulse: experiment and modeling** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)
-
14. Данилов П. А., Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Руденко А. А., Кучмижак А. А., Витрик О. Б., Кульчин Ю. Н., Жаховский В. В., Иногамов Н. А. (Danilov P.A., Zayarny D.A., Ionin A.A. Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A.) **Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки** Письма в ЖЭТФ (2016 г.)
-
15. Ильницкий Д.К., Хохлов В.А., Жаховский В.В., Петров Ю.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А. (Ilitskiy, D. K.; Khokhlov, V. A.; Zhakhovsky, V. V.; Petrov, Y. V.; Migdal, K. P., Inogamov, N. A.) **Dynamics of laser ablation at the early stage during and after ultrashort pulse** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)
-
16. Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V.) **Surface 3D nanostructuring by tightly focused laser pulse: simulations by Lagrangian code and molecular dynamics** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)
-
17. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Мигдал К.П. (Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Migdal K.P.) **Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump** Applied Physics A (2016 г.)
-
18. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Кучмижак А.А., Кудряшов С.И. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.; Kuchmizhak, A. A., Kudryashov, S. I.) **Blistering of film from substrate after action of ultrashort laser pulse** Journal of Physics: Conference Series (2016 г.)
-
19. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Мигдал К.П. (Inogamov N. A.,

20. Кучмижак А.А., Витрик О., Кульчин Ю., Стороженко Д., Майер А., Мирошник А., Макаров С.В., Миличко В.А., Кудряшов С., Жаховский В.В., Иногамов Н.А. (Kuchmizhak, A.; Vitrik, O.; Kulchin, Y.; Storozhenko, D.; Mayor, A.; Mirochnik, A.; Makarov, S.; Milichko, V.; Kudryashov, S.; Zhakhovsky, V. & Inogamov, N.) **Laser printing of resonant plasmonic nanovoids** Nanoscale (2016 г.)

21. Мигдал, К.П., Петров, Ю.В., Ильницкий Д.К., Жаховский В.В., Иногамов, Н.А., Хищенко К.В., Князев, Д.В., Левашов П.Р. (Migdal, K. P.; Petrov, Y. V.; Il'nitsky, D. K.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Khishchenko, K. V.; Knyazev, D. V. & Levashov, P. R.) **Heat conductivity of copper in two-temperature state** Applied Physics A (2016 г.)

22. Пикуз Т.А., Фаенов А.Я., Озаки Н. ... Жаховский В.В., Сафронова А.С., Стаффорд А., Скобелев И.Я., Пикуз С.А. и др. (Pikuz, T. A.; Faenov, A. Y.; Ozaki, N. ... Zhakhovsky, V.; Inogamov, N.; Safronova, A. S.; Stafford, A.; Skobelev, I. Y.; Pikuz, S. A. et al.) **Indirect monitoring shot-to-shot shock waves strength reproducibility during pump-probe experiments** Journal of Applied Physics (2016 г.)

23. Ашитков С.И., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Агранат М.Б., Канель Г.И. (Ashitkov, S. I.; Zhakhovsky, V. V.; Inogamov, N. A.; Komarov, P. S.; Agranat, M. B. & Kanel, G. I.) **The behavior of iron under ultrafast shock loading driven by a femtosecond laser** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

24. Жаховский В.В., Мигдал К.П., Иногамов Н.А., Анисимов С.И. (Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Inogamov, N. A. & Anisimov, S. I.) **MD simulation of steady shock-wave fronts with phase transition in single-crystal iron.** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

25. Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky) **SIMULATIONS OF SHORT PULSE LASER-MATTER INTERACTION** Lobachevskii Journal of Mathematics (2017 г.)

26. Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В., Мигдал К.П., Ильницкий Д.К., Хасегава Н., Нишикино М., Ямагиwa М., Ишино М., Кавачи Т., Фаенов А.Я., Пикуз Т.А., Баба М., Минами Ю., Суемoto Т. (Inogamov, N. A.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Il'nitsky, D. K.; Hasegawa, N.; Nishikino, M.; Yamagiwa, M.; Ishino, M.; Kawachi, T.; Faenov, A. Y.; Pikuz, T.; Baba, M.; Minami, Y. & Suemoto, T.) **Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount.** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

27. Хохлов В.А., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Ильницкий Д.К., Мигдал К.П., Шепелев В.В. (V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, D.K. Il'nitsky, K.P. Migdal and V.V. Shepelev) **Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation** AIP Conference Proceedings (2017 г.)

5.6. Возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:

нет

5.7. Публикационные показатели реализации проекта

(нарастающим итогом, данные формируются автоматически)

Показатели публикационной активности приводятся в отношении публикаций, имеющих соответствующую ссылку на поддержку Российского научного фонда. Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

| Показатели | Единица измерения | 2014 г. | | 2014 - 2015 г. | | 2014 - 2016 г. | |
|--|-------------------|---------|------|----------------|------|----------------|------|
| | | план | факт | план | факт | план | факт |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) | Ед. | 3 | 3 | 8 | 9 | 12 | 23 |
| Число цитирований публикации по проекту членов научной группы в научных журналах, индексируемых в международной базе данных «Сеть науки» (Web of Science) в отчетном году | Ед. | 0 | 0 | 0 | 160 | 0 | 274 |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Скопус» (SCOPUS) | Ед. | 3 | 3 | 8 | 11 | 12 | 24 |
| Количество публикаций по проекту членов научной группы, индексируемых в базе данных «РИНЦ» | Ед. | 3 | 3 | 8 | 9 | 12 | 20 |
| Количество монографий по проекту членов научной группы | Ед. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Количество зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности по проекту членов научной группы | Ед. | | 0 | | 0 | | 0 |

5.8. Научной группой опубликовано с указанием на получение финансовой поддержки от Фонда по направлению научного исследования не менее 12 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science) и не менее 0 монографий:

да

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- что при обнародовании результатов выполненного в рамках поддержанного РНФ проекта научная группа ссылалась на получение финансовой поддержки проекта от РНФ и организацию, на базе которой выполнялось исследование;
- свое согласие с опубликованием РНФ сведений из итогового отчета о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»;
- что проект не имел других источников финансирования;
- что проект не являлся аналогичным* по содержанию проекту, одновременно финансируемому из других источников.

* Проекты, аналогичные по целям, задачам, объектам, предметам и методам исследований, а также ожидаемым результатам. Экспертиза на совпадение проводится экспертным советом Фонда.

Подпись руководителя проекта _____/С.И.Анисимов/

Изменения в составе участников

Петров Юрий Васильевич

Пикуз Татьяна Александровна

Шепелев Вадим Владимирович

Дьячков Сергей Александрович

Егорова Мария Сергеевна

Сергеев Олег Вячеславович Исключен

Иногамов Наиль Алимович

Жаховский Василий Викторович

Ильницкий Денис Константинович

Мигдал Кирилл Петрович

Хохлов Виктор Александрович

Паршиков Анатолий Николаевич

Фаенов Анатолий Яковлевич

Мурзов Семен Александрович