

Форма «Т». Титульный лист отчета о выполнении проекта

Название проекта: Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в трехмерной геометрии		Номер проекта: 14-19-01599	
		Код типа проекта: ОНГ-П	
		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 2017 г.: 6000 тыс. руб.		Год начала проекта: 2017	Год окончания проекта: 2018
		Объем финансирования, запрашиваемый на 2018 год: 6000 тыс. руб. (для продолжающихся проектов)	
Перечень приложений к отчету	<ol style="list-style-type: none"> 1. Копии публикаций в соответствии с Formой 2о - 17 шт. на 36 стр. в 1 экз. <i>К печатному экземпляру отчета прикладываются только копии первой (с указанием авторов) страницы и страницы со ссылкой на поддержку отРНФ.</i> 2. Дополнительный материал (отчет с иллюстрациями), приложенный п. 1.6 1 шт. на 53 стр. в 1 экз. 3. Дополнительный материал с иллюстрациями к плану на 2018 г., приложенный п. 3.3 1 шт. на 15 стр. в 1 экз. 		
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 _____ /С.И.Анисимов/		Дата подачи отчета: 15 декабря 2017 г.	
Подпись руководителя организации _____ / _____ /			
		Печать (при наличии) организации	

Отчет о выполнении проекта
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»,
в 2017 году

1.1. Заявленный в проекте план работы на год

Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

Коллектив представляет собой связанную команду, ядро которой имеет опыт совместной работы по проекту РФФ 14-19-01599. Молодежная секция тесно вовлечена в работу. Относительно молодых участников, которые были в составе при выполнении проекта РФФ, можно сказать, что благодаря проекту, благодаря важным научным проблемам, быстро возрастает их профессиональная квалификация. Из вчерашних студентов они превратились в матерых одержимых научных работников, самостоятельно пишущих статьи и выступающих на международных конференциях.

Детальный план работ на 2017 г. коллектива в целом выписан в пункте 4.4 формы 4.

Распределение обязанностей среди основных исполнителей

Анисимов Сергей Иванович. Общее руководство проектом, оперативная оценка текущего результата, обоснование маневров, предпринимаемых для достижения цели. Составление отчета по проекту (в случае его поддержки) за 2017 г. Осмысление результатов, подготовка материалов и написание статей.

Иногамов Наиль Алимович. На нем лежит разработка конкретных физических моделей для всех задач, которые будут решены за время осуществления проекта. Он создаст полуаналитические численные схемы расчетов. Будет курировать постановку и ход создания алгоритмов и ход моделирования. Решит задачу о сложном ЭМ поле, действующем на геометрически сложный объект (не однородное полупространство с плоской границей); эта задача решается им во взаимодействии с остальными участниками проекта. Решит задачи об описании экспериментов с комбинацией синхронизованных оптического лазера и рентгеновского лазера. Решит задачу о роли давления возбужденных электронов в динамических явлениях. Решит задачи о воздействии лазерного излучения на частицу конденсированной фазы. Создаст модели масштабирования для расширения возможностей МД-МК (молекулярная динамика вместе с Монте-Карло) кода. Подготовка документации, отчетов, статей.

Жаховский Василий Викторович. Крупнейший специалист в области физических моделей и всех аспектов проблем программирования. Создатель эффективного производительного многопроцессорного кода молекулярно-динамического (МД) моделирования, основанного на динамическом разбиении расчетной области с помощью многогранников Вороного. Этот код лежит в основе подходов для решения запланированных задач. Создатель варианта кода Монте-Карло, нацеленного на решение тепловых задач совместно с МД кодом. С его участием разработана многопроцессорная версия SPH (smooth particles hydrodynamics), которая очень понадобится в расчетах распыления капель. Решит задачу о сложном ЭМ поле, действующем на геометрически сложный объект (не однородное полупространство с плоской границей); эта задача решается им во взаимодействии с остальными участниками проекта. Решит задачи об описании экспериментов с комбинацией синхронизованных оптического лазера и рентгеновского

лазера. Решит задачу о роли давления возбужденных электронов в динамических явлениях. Решит задачи о воздействии лазерного излучения на частицу конденсированной фазы. Создаст межатомные и межмолекулярные потенциалы для МД кода. Подготовка документации, отчетов, статей.

Петров Юрий Васильевич. Крупный специалист проекта по вопросам конденсированных сред с возбужденными электронами. Для успеха проекта большое значение имеют выполняемые им расчеты термодинамических и транспортных свойств систем с высокой плотностью энергии. На нем также лежат расчеты оптических и рентгеновских ЭМ полей. Петров Ю.В. решит задачу об описании экспериментов с комбинацией синхронизованных оптического лазера и рентгеновского лазера. Решит задачу о роли давления возбужденных электронов в динамических явлениях. Решит задачу о разрушении многослойных рентгеновских зеркал. Подготовка документации, отчетов, статей.

Краткая характеристика и распределение обязанностей среди участников проекта

Хохлов Виктор Александрович. Крупный специалист по гидродинамическому программированию. Им создан код для описания двухтемпературной гидродинамики. В рамках проекта в 2017 г. им будет произведена модификация кода для решения двухслойных задач и для решения многослойных задач. Решит задачи о движении многослойных мишеней под действием заданного ЭМ поля. Изучит вопросы контакта горячих металлов с жидкой фазой. Подготовка документации, отчетов, статей.

Трибельский Михаил Исаакович. Крупный специалист по расчетам дифракции на субволновых объектах. Будет вести соответствующие полуаналитические расчеты. Будет предоставлять описания ЭМ полей в виде, удобном для применения в наших гидро- и МД кодах.

Фаенов Анатолий Яковлевич. Крупный специалист в области рентгеновской спектроскопии. Известен своими работами в области опытов с применением рентгеновских лазеров. Ответственен за связь с экспериментом, за сверку расчетно-теоретических результатов с данными японских опытов на лазере KPSI 89.3 эВ и на XFEL/RIKEN машине.

Молодежная секция

Шепелев Вадим Владимирович. Специалист по гидродинамическому программированию. Его вариант двухтемпературного кода будет им приспособлен для решения задач в 2D геометрии.

Мигдал Кирилл Петрович. Специалист по численным аспектам теории конденсированных сред. Свободно владеет DFT (density functional theory) и QMD (quantum molecular dynamics) пакетами программ в их многопроцессорных версиях. Отвечает за модели и расчеты термодинамических и транспортных свойств систем с высокой плотностью энергии

Ильницкий Денис Константинович. Virtuoz программирования одномерных и двумерных задач в гидродинамической постановке со сложной физикой (двухтемпературность, упруго-пластика). Отвечает за блок гидродинамических задач.

Григорьев Сергей Юрьевич. Расчеты SPH и МД кодами лазерных задач.

Дьячков Сергей Александрович. Расчеты SPH и МД кодами лазерных задач и задач пыления при выходе UV на поверхность.

Егорова Мария Сергеевна. Совершенствование SPH кода и расчеты SPH кодом.

Мурзов Семен Александрович. Расчеты МД кодом. Графическая часть работы – иллюстрации результатов МД расчетов (пакет AtomEye).

Петрищев Дмитрий Юрьевич. Расчеты SPH и МД кодами лазерных задач.

Уманская Софья Филипповна. Эксперимент со сложными полями и мишенями, связь с ФИАН, ИТМО, ИАПУ по вопросам эксперимента.

1.2. Заявленные научные результаты на конец года

Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

2017 г. очень важен для выполнения заявки. Именно в этот год произойдет перестройка на новые задачи, будут созданы новые или модифицированные алгоритмы. Далее будет происходить накопление данных, сравнение с опытами, публикация результатов.

[А] Оптические лазеры. Будут решены задачи со сложным полем, действующим на сложные мишени (задачи 1-3):

(1) высокие значения числовой апертуры $NA > 0.5$ и толстая пленка на подложке;

(2) фазовые пластинки, действие на пленки и многослойные покрытия радиально поляризованного излучения;

(3) электромагнитное поле, возникающее вследствие интерференции лазерной электромагнитной (ЭМ) волны с плазмон-поляритонными (ППР) модами, и воздействие на мишень с шариком или бугорком на пленке.

(4) Будет решена задача об остросфокусированном воздействии на пленочную мишень наносекундного импульса.

[В] Будет решена задача о последствиях воздействия субнаносекундного (600 пс) оптического лазерного импульса на пленку 3-5 мкм железа или тантала и диагностики результатов воздействия с помощью ультракороткого (единицы фс) жесткого (10-20 кэВ) лазерного импульса XFEL (X-ray Free Electron Laser). Диагностируется процесс распространения волны сжатия по пленке, опрокидывания волны сжатия и отражения этой волны от границы пленка-вакуум. Диагностика осуществляется с помощью схемы pump-probe, в которой probe импульсом является импульс XFEL. Этот импульс поставляет нам «мгновенную» (относительно масштаба времени эволюции волновой картины) дифракционную картину происходящего. Решение осуществляется с помощью применения физических моделей вместе с гидродинамическим и молекулярно-динамическим (МД) кодами. МД код будет дополнен специально разработанной программой расчета дифракционной линии на динамически деформированном поликристалле.

На два года рассчитано решение задачи о воздействии рентгеновского излучения на многослойное зеркало, толщины слоев в котором соответствуют длине волны излучения рентгеновского лазера.

Будет начато решение трудной задачи о моделировании диспергирования капель олова с добавкой иридия. Такое диспергирование капель расплава необходимо для создания плазмы олова [1,2] (оловянная лампочка – сердце EUV lithography машин). Диспергирование осуществляется оптическим лазерным импульсом. На нынешнем этапе имеются только данные

опытов. Они подтверждают, да, диспергирование имеет место, см. [2]. Нами в рамках работы по заявке на продление гранта РФФИ 14-19-01599 за 2017 г. будут выяснены механизмы, лежащие в основе данного явления.

Будут исследованы быстропротекающие процессы, инициированные оптическим лазерным ударом (pump) по пленке из золота на кремниевой или стеклянной подложке. В эксперименте исследование осуществляется новаторскими методами. В таком новом подходе в качестве probe импульса применяется лазер на мягком рентгене (13.9 нм, 89.3 эВ). Ранее либо probe импульс излучался из оптического лазера (для построения оптического изображения), или это был жесткий рентгеновский импульс для получения картины дифракции. В нашем случае мягкий рентгеновский probe импульс применяется для построения «мгновенного» изображения облученной области мишени в рентгеновской оптике. Этот подход имеет преимущества перед оптическим probe импульсом. Из-за малой длины ЭМ волны кольца Ньютона видны при на 2 порядка меньших раскрытиях зазора между откольным куполом и дном формирующегося кратера. Это позволяет заглянуть на исключительно раннюю стадию развития процесса. За 2017 г. нами будет создан комплекс программ для расшифровки данных, полученных с помощью такой диагностики. Схема установки приведена в статье [27].

Будут изучены вопросы перемещения и разделения веществ при воздействии острогофокусированного импульса жесткого (10-20 кэВ) рентгена на 2-х и более слойные покрытия из чередующихся разных веществ. Для решения данных вопросов будут созданы и откалиброваны соответствующие физические модели и соответственно расширен пакет наших компьютерных программ.

[C] В 2017 г. будут закончены исследования проблемы о роли электронного давления в динамических процессах в поверхностном слое облученной мишени. С одной стороны эти исследования важны сами по себе, с другой – они требуются для расшифровки экспериментов, проводимых в KPSI. В них лазер на мягком рентгене применяется для наблюдения за эволюцией области облучения, созданной ультракоротким воздействием оптического лазера. В этом отношении данная проблема связана с задачами построения рентгеновских оптических изображений области облучения, см. предыдущий пункт плана работ.

[D,E] Будет решена задача о структуре диссипативной зоны в частицах субволновых размеров под действием лазерного импульса. В случаях, когда размер частицы больше толщины скин слоя и больше толщины слоя прогрева d_T ультракоротким воздействием, распределение поглощенной энергии по поверхности частицы играет решающую роль в последующих тепловых и гидродинамических процессах. С учетом реального распределения энергии будет определена дальнейшая судьба частицы.

Для частиц с радиусом меньшим, чем глубина прогрева d_T , решение ЭМ части задачи сводится к определению сечения поглощения энергии; величина d_T на порядок меньше длины ЭМ волны в оптическом диапазоне. Задача о сечении уже решена в литературе. Для частиц, меньших d_T , распределение поглощенного тепла примерно однородно по частице. В этом случае, как и в случае $d_T < r < \lambda$, будет проведено гидродинамическое и МД моделирование термомеханических эффектов; здесь r – радиус частицы. Гидродинамическое моделирование учитывает всю шкалу двухтемпературных явлений. МД моделирование строится с учетом данных двухтемпературной гидродинамики. Параллельно будет решаться задача о производстве частиц при лазерном воздействии на твердую мишень через прозрачную жидкость.

Будут начаты исследования по описанию дробления относительно крупных частиц (размерами

больше оптической длины волны) лазерным импульсом. Как говорилось выше, данный круг вопросов выполняется в интересах оптимизации работы плазменного источника для литографических машин. В случае крупных частиц для описания поверхности со слоем прогрева будет применено приближение геометрической оптики. Крупномасштабная (порядка радиуса) неоднородность распределения поглощенной энергии и малость отношения d_T / r затрудняет моделирование. Кроме того, требуется специализированное скалирование параметров, для того, чтобы методами МД описать ситуацию. Это скалирование будет разработано в рамках проекта.

SPH (smooth particle hydrodynamics) код в многопроцессорном варианте будет модифицирован под решение задач о лазерном воздействии на частицы.

На базе SPH кода будет продолжено решение задач «пыления» [3,26], но теперь в 3D геометрии; задачами пыления называются задачи о выходе ударной волны на неровную поверхность границы конденсированной среды с вакуумом.

[F,G] Будут разработаны межмолекулярный потенциал воды и перекрестный потенциал, учитывающий взаимодействие атомов золота и молекул воды. Перекрестный потенциал требуется для описания динамического взаимодействия расплава золота и воды в закритических состояниях возле границы их соприкосновения в задаче об абляции золота через прозрачную воду ультракоротким лазерным импульсом.

Будут созданы межатомные потенциалы олова и золота с искусственно пониженным коэффициентом поверхностного натяжения. При этом все остальные параметры соответствуют табличным данным. Данные потенциалы требуются для масштабирования задачи по капиллярному числу (скейлинг). Масштабирование необходимо, чтобы обойти ограничения на число атомов и длительность расчета (число шагов по времени). Ограничения связаны с пределами на доступные численные ресурсы. Будут усовершенствованы приемы масштабирования для применения в МД-МК (МД и Монте-Карло) коде.

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

Коллектив сотрудников гранта РФФИ 14-19-01599 с глубоким прискорбием сообщает о кончине важнейшего участника коллектива

Анатолия Яковлевича Фаенова,

доктора технических наук, автора более 400 статей, трех монографий, индекс цитирования 7200, индекс Хирша 39.

Анатолий Яковлевич скончался 3-го ноября 2017 г. в госпитале в г. Осака.

До последних месяцев Анатолий Яковлевич поддерживал рабочую связь с коллективом. За этот год с его участием подготовлены три важные статьи, вошедшие в отчет:

Albertazzi, N. Ozaki, V. Zhakhovsky, A. Faenov et al., Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress, Sci. Adv. (2017)

Faenov et al., Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount, AIP Conference Proceedings (2017)

Faenov, A. et al., Soft x-ray laser ablation of metals and dielectrics, Proceedings of SPIE (2017)

Анатолий Яковлевич был крупнейшим специалистом по рентгеновским воздействиям, спектроскопии и рентгеновским лазерам, а главное отличным человеком, добрым товарищем.

Никогда не скупился на советы, видел дальнюю перспективу работы.

Будем двигаться по плану на 2017 г. пункт за пунктом. Пункт [А]:

За 2017 г. удалось получить много новых результатов в соответствии с пунктом [А].

A1. (Это пункт 1 в разделе А) Большая совместная работа была выполнена с группой экспериментаторов из (i) австралийских центров микрофотоники и нанофабрикации, (ii) группы дальневосточных научных организаций и (iii) ФИАНа, ИТМО СПб. В теоретической и численной работе по гранту участвовали сотрудники ВНИИА им. Н.Л. Духова и нашего Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау, головного по проекту. Работа нацелена на управляемое создание оптимальных поверхностных структур субволновых размеров [1.7-3] (публикация 3 в списке публикаций за год по результатам проекта, приложенных к отчету (имеются pdf), пункт 1.7), для чего требуется крупномасштабное численное моделирование. В таких структурах искусственно создается необходимая эффективная диэлектрическая проницаемость. Как показывают наши предыдущие работы и работы других авторов, это позволяет контролировать потоки электромагнитной энергии на наномасштабах, см., например, [1-доп].

Субволновые структуры создаются лазерной печатью на пленках с помощью ультракоротких лазерных импульсов, см. рис. 1 в [1.7-3] и приложенном п. 1.6 файле. Такая печать является перспективной, гибкой, относительно дешевой и экологичной технологией создания больших массивов субволновых структур посредством трансляционной и абляционной модификации пленок на подложках. Управление морфологией элементов массивов осуществляется путем настройки энергии лазерного импульса и диаметра пятна нагрева на пленке. Для уменьшения диаметра применяются объективы с большой числовой апертурой.

Сверхбыстрое (длительность импульса 230 фс) выделение лазерной энергии в пленках металлов индуцирует быстрое плавление и движение расплава, в результате которого происходит сложное перераспределение вещества пленки на наномасштабах. Это перераспределение, как показывает наше моделирование [1.7-3], фиксируется «навечно» после рекристаллизации горячего расплава. Плавление-переток-кристаллизация формируют морфологию структур на рис. 1 в [1.7-3] и приложенном п. 1.6 файле. Морфологические нанохарактеристики структур (диаметр, кривизна купола, застывшая струя (джет) в вершине, капля на джете и др.) сильно влияют на оптический отклик при плазмонном зондировании. Это позволяет применять полученные массивы структур в нелинейных оптических приложениях [1-доп].

В работе [1.7-3] мы детально сопоставили результаты физической модели и крупномасштабного моделирования с одной стороны и измерения, выполненные с помощью двух оригинальных экспериментальных методик, с другой стороны. Таким образом, доказана адекватность моделирования. Одна экспериментальная методика состояла в изучении внутренней структуры образований путем их рассеяния сфокусированным ионным пучком (FIB, Focused Ion Beam). Действуя по другой методике, структура изучалась с помощью рентгеновской спектроскопии (EDX, energy dispersive x-ray fluorescence). При нашем моделировании учитывались все физические процессы, связанные с поглощением лазерной энергии, электрон-ионным энергетическим обменом, акустической релаксацией и гидродинамическим движением [1.7-3]. Был применен комбинированный теоретический подход, основанный на разделении относительно медленного гидродинамического движения пленки и быстрых физических процессов, определяющих сепарацию пленки от подложки. Мы сочетали двухтемпературные расчеты (на ранней стадии электроны намного горячее ионов), молекулярно-динамическое моделирование и полуаналитическую модель тонких оболочек. Такой расширенный подход нужен для детального моделирования отклика ближнего поля, он открывает путь к полностью автоматизированному, неразрушающему контролю высокопроизводительного лазерного производства. Рассмотренное

физическое и численное моделирование обеспечивает точное прогнозирование масштабов и морфологии массивов субволновых структур.

Проанализировано влияние толщины пленки на динамику при лазерном воздействии различной длительности от десятков фемтосекунд до субнаносекундного диапазона [1.7-5]. Решение этой проблемы существенно для технологий лазерного переноса вещества (LIFT/LIBT – laser induced forward/ backward transfer, лазерная печать). Самые разные вещества (металлы, диэлектрики, полупроводники, керамики, полимеры, биологические частицы) могут быть перенесены с донора на принимающую подложку с помощью LIFT/LIBT. Для разных приложений переносимые капли должны быть разных размеров. Для плазмоники нужны мелкие капли нанометрового – субмикронного размеров [2-доп,3-доп,4-доп], тогда как для создания квантовых точек или пирамидальных образований требуются капли микронного и больше диапазона [5-доп—10-доп]. Такие капли формируются в случае толстых пленок.

Анализ толстых пленок, их режимов сепарации от подложки, намного сложнее, чем в случае тонких пленок. Имеется пространственный масштаб, равный глубине прогрева лазером. Тонкими являются пленки, толщина которых мала по сравнению с этим масштабом. Наоборот, в случае толстой пленки ее толщина существенно превосходит указанный масштаб, см. классификацию в [1.7-5]. Динамика тонких пленок детально изучена в наших работах по гранту РФФИ [1.7-3,10,19]. В работе [1.7-5] разъяснено, какие события имеют место в случае воздействия на толстую пленку (см. рис. 1-3 из этой работы и приложенный п. 1.6 файл). Анализ этих событий позволяет понять, что происходит в опытах [7-доп – 9-доп], в которых авторы приводят только данные экспериментов и качественные рассуждения.

A2. В рамках работы над проектом выполнена работа по моделированию воздействия рентгеновского оптического вихря на многослойную мишень [1.7-11+12]. Понято явление формирования центрального заострения в окрестности центра, т.е. в области, где интенсивность воздействия близка к нулю [1.7-11+12]. Далее при удалении по радиусу от центра эта интенсивность сначала возрастает, а потом начинает убывать, т.е. распределение интенсивности имеет форму бублика. До этой работы воздействие световыми вихрями изучалось только с применением лазеров инфракрасного и оптического диапазонов. Работа [1.7-11] выполнялась совместно с экспериментаторами из Японии. Лазерный импульс жесткого (7.71 кэВ) рентгена излучался из XFEL – x-ray free electron laser SACLA [14-доп]. Это фемтосекундный импульс с длительностью 10 фс. Длина волны 1.6 Ангстрем на четыре порядка по сравнению с лазером оптического диапазона уменьшает лимитированный дифракцией размер минимального пятна фокусировки (в наших экспериментах этот предел не достигается, размер пятна порядка мкм). Использовалась спиральная фазовая пластинка Френеля, которая создает нулевое поле и фазовую аномалию в центре сфокусированного рентгеновского пучка. Рассматривались как однослойные, так и многослойные мишени. В многослойном случае крупномасштабное численное моделирование было проведено для чередующихся слоев золота и хрома (всего пять слоев), напыленных на кремниевую подложку.

Воздействие импульса с распределением интенсивности в виде бублика приводит к формированию тороидальной оболочки из расплавленных металлов. Решающим (для формирования заострения в центре) оказывается действие капиллярного натяжения во внутреннем кольце тороида. Оно приводит к стягиванию внутреннего кольца к оси, превращению его в трубку и сжатию трубки в центральную колонкообразную затвердевшую структуру [1.7-11+12].

В работах [1.7-2,6,8] по проекту было изучено формирование чрезвычайно острых острий (игл) при

фокусировке в ограниченное дифракцией малое пятно на пленке. Иглы имеют радиус скругления в вершине в единицы нанометров. Такие иглы могут применяться, например, как концентраторы электрического поля на вершине. Найдено, что в окрестности заострения возникают необычные кристаллические формы с 5-кратной симметрией (икосаэдр) [1.7-2,6]. Процесс затвердевания струи, формирующейся на вершине нанобампа, и разрыва струи в твердом состоянии с образованием резкого заострения показан на рис. 15-17 из [1.7-2] и рис. A2.1 в приложенном п. 1.6 файле.

A3. Важной целью проекта РФФ 14-19-01599 (запланированной на два года исполнения проекта) является моделирование задач со сложным электромагнитным (ЭМ) полем, решаемых совместно с решением задачи о теплофизическом и динамическом отклике мишени на данное воздействие. Теплофизика означает, что рассматриваются двухтемпературные явления (электроны горячее ионов, происходит выравнивание температур), плюс плавление, плюс испарение, плюс рекристаллизация. Динамика заключается в перетоках вещества мишени с учетом инерции, капиллярных сил и давления паров, см. один из случаев «сложное поле/трехмерные термомеханические явления» выше в пункте A1 [1.7-3,5,10,19] – там сложное поле создается высокоапертурным объективом, фокусирующим ЭМ излучение в исключительно малое фокальное пятно с распределением интенсивности, которое контролируется объективом и эффектами дифракции. В разделе A3 сложное поле создается за счет интерференции плазмон-поляритонной (ППР) моды и падающей ЭМ волны.

Здесь мы продвигаем вперед физику взаимодействия излучения с веществом (ФВИВ) по сравнению с тем, что было раньше (i, ii, iii).

(i) Ранее разными авторами рассматривалась одномерная (1D) постановка, при которой имелось однородно распределенное по плоскости мишени поле, см., например, [1.7-10,19].

(ii) На следующем этапе развития ФВИВ, совместно (т.е. поле/термомеханика в 3D геометрии) изучается задача о пятне [1.7-3,5,8] раздел A1 или о кольце нагрева [1.7-11+12] раздел A2.

(iii) В разделе A3 речь идет о совместно (3D-поле/3D-термомеханика) решаемой проблеме воздействия интерференционного ЭМ поля. Это новая проблема. Требуется рассчитать диссипацию в скин-слое суммарного поля от плазмонной моды и внешней ЭМ волны. Такая диссипация неоднородна по плоскости (интерференционные полосы). Важно то, что полосы «пропечатываются» в рельефе мишени за счет термомеханических эффектов вследствие процессов плавления-перемещения-затвердевания. Насколько нам известно, в такой постановке (ЭМ полосы и термомеханика) проблема ранее не рассматривалась ввиду ее сложности.

Проблема является весьма актуальной для современной плазмоники. Большой интерес представляют устройства генерации ППР волн. Мы в проекте рассматриваем голографию как механизм генерации. Для этого требуется создать периодическую структуру на поверхности (голограмму). Тогда, освещая эту структуру падающей плоской ЭМ волной EMW , можно возбудить бегущую поверхностную ППР волну (PPW). При этом падающая волна EMW становится опорной волной в голографии, а бегущая ППР волна PPW является восстановленным изображением (см. рис. 5 в приложенном п. 1.6 файле)

Спрашивается, (а) как создать необходимую периодическую структуру, чтобы выполнялось фазовое согласование между опорной волной и ППР модой, и (б) как добиться, чтобы эта структура имела требуемый пространственный период?

Мы рассматриваем два варианта «печатания» голограмм.

В первом варианте лазерный импульс расщепляется на два. Один проходит через стеклянный клин и освещает под резонансным углом тонкую пленку, нанесенную на торец клина. При этом в

пленке возбуждается поверхностная плазмонная волна. Система из клина, пленки и резонанса называется конфигурацией Кречмана [15-доп, 16-доп]; возбуждение акустических осцилляций в пленке в геометрии Кречмана изучалось в работе [17-доп]. Второй импульс освещает пленку со стороны вакуума. Таким образом, ППР мода и внешняя ЭМ волна имеют одинаковую частоту изменения во времени. Подробнее с иллюстрациями см. в приложенном п.1.6 файле.

Во втором варианте лазерный импульс воздействует на уединенную структуру на металлической пленке [20-доп], см. рис. 9 в приложенном п.1.6 файле. Эта структура создается предварительно острорасфокусированным импульсом на пленке (примеры таких уединенных поверхностных структур приведены в [1.7-3]).

Первым выстрелом создается структура в виде купола, конуса или купола с джетом на вершине. Вторым выстрелом генерируется плазмонная волна, которая бежит от купола. Во время действия импульса эта волна интерферирует с падающей ЭМ волной. Возникает стоячая волна, гофры которой пропечатываются на поверхности пленки наподобие волн на поверхности воды от брошенного камня см. рис. 9 в приложенном п.1.6 файле.

Нами проведено моделирование, которое определяет длину волны плазмонной моды (около 400 нм) и глубину модуляции максимум/минимум стоячей волны (десятки процентов). Эти данные похожи на те, которые соответствуют первому варианту. Далее выполнено теплофизическое/гидродинамическое моделирование с помощью метода тонких пленок (см. [21-доп]) и крупномасштабной молекулярной динамики (МД). Ранее ни метод тонких пленок, ни МД не применялись для задач с периодической гофрировкой.

Благодаря решениям с тонкой пленкой [21-доп], нам удалось подготовить данные для оптимального МД расчета. Это важно, поскольку вслепую перебирать МД постановки слишком накладно по ресурсам и времени.

Распределение поглощенного тепла с модуляцией из-за действия стоячей волны приводит к модуляции скорости отскока пленки от подложки. Длительность вторичного лазерного импульса (короче пикосекунды), создающего гофрировку, намного меньше длительности формирования гофрировки (единицы и десятки наносекунд). За это время температура выравнивается по пространственному периоду гофрировки и обычно остается выше температуры кристаллизации золота (расчеты проведены для пленки из золота). Заморозка гофры связана с отводом тепла за масштаб гофрировки. В МД соответствующий процесс моделируется за счет охлаждения всей пленки на периоде 500 нм расчета. Охлаждение осуществляется с помощью термостата, уменьшающего в нужном заранее вычисленном темпе (решение тепловой задачи) скорости атомов (см. поперечные плоскости рисунка 10 в приложенном п.1.6 файле).

Соответствующая методика описывает оба варианта формирования голограмм.

Подробнее с иллюстрациями см. в приложенном п.1.6 файле.

Работы, выполненные по разделу А3, готовятся к публикации.

А4. Расчеты воздействия длинных (нс) импульсов.

За отчетный год подготовлена программа в приближении тонкой пленки [21-доп] для решения задач с наносекундными импульсами. В версии [21-доп] учитывалась инерция пленки и поверхностное натяжение. Теперь добавлена, во-первых, программа с теплопроводностью. Она в простом приближении описывает растекание тепла по пленке. В настоящий момент в программе с теплопроводностью (ПТ-блок) не учитывается изменение формы пленки при движении. Тепло растекается по плоской двумерной пленке; потерями на испарение и отводом тепла в подложку пренебрегаем, это справедливо в случае подложек с низкими значениями коэффициента теплопроводности. ПТ-блок нужен нам для оценки темпа остывания пленки.

Во-вторых, мы учитываем зависимость давления насыщенного пара металла пленки от температуры. На каждом временном шаге берем из ПТ-блока наибольшую температуру по пленке – в вершине нанобампа – и находим по этой температуре давление насыщенного пара под куполом нанобампа. Пренебрегаем давлением пара с внешней стороны пленки.

Проведена серия вычислений в таком приближении. Типичный результат представлен на рис 12 в приложенном п.1.6 файле.

Отметим, что теоретических работ по наносекундным импульсам, действующим на пленки пока, насколько нам известно, не имеется; экспериментальных работ много. Предстоит отработать постановку задачи для МД моделирования и подготовить первую статью. Результаты будут направлены в печать.

[В] Исследована задача о последствиях воздействия субнаносекундного (600 пс) оптического лазерного импульса на пленку 3-5 мкм железа или тантала и диагностики результатов воздействия с помощью ультракороткого (единицы фс) жесткого (10-20 кэВ) лазерного импульса XFEL (X-ray Free Electron Laser).

Понимание явления разрушения материала при чрезвычайно высоких скоростях деформации является ключевым вопросом для широкого круга научных исследований, начиная от прикладных наук и технологических разработок до областей фундаментальной науки, таких как взаимодействие лазерного вещества и геология. При всей важности, его исследование опирается на тонкое многомасштабное описание между атомным масштабом и макроскопическими процессами, которые пока достижимы только при крупномасштабном атомном моделировании. Прямой сверхбыстрый мониторинг динамического разрушения (расщепления) в реальном масштабе времени в масштабе атомной решетки с пикосекундным временным разрешением оказался недоступен экспериментальным методам. В нашей работе показано, что связь между импульсом мощного оптического лазерного греющего импульса и импульсом фемтосекундного рентгеновского зонда, генерируемым рентгеновским лазером на свободных электронах, позволяет выявить динамику решетки в танталовой фольге при сверхвысокой скорости деформации $\sim 2 \times 10^8$ до $3,5 \times 10^8$ 1/с. Максимальное падение плотности от 8 до 10%, связанное с началом расщепления при прочности на отрыв ~ 17 ГПа, непосредственно измерялось с помощью рентгеновской дифракции. Экспериментальные результаты эволюции плотности хорошо согласуются с крупномасштабным атомистическим моделированием распространения ударной волны и разрушения образца.

Запланированное полностью выполнено. Результаты опубликованы в статье [1.7-1].

Выполнен важный цикл исследований в области лазерной генерации ударных волн вместе с исследованиями по распространению УВ [1.7-4,13,16]. Очень интересные результаты получены в работах [1.7-4,16]. Они относятся к моделированию распространения УВ в прочных керамиках наподобие карбида бора и др. Показано, что методика SPH в нашей многопроцессорной реализации позволяет с высокой точностью описывать многоэтапный процесс разрушения керамик. Результаты хорошо согласуются с измерениями, а также с одномерными численными расчетами. Но в отличие от таких расчетов, мы видим внутреннюю структуру волн разрушения, см. [1.7-4] и рис. В.1 в приложенном п.1.6 файле.

В работе [1.7-13] проанализировано нагружение жидкой среды металлическими шарами. Через такую смесь проходит сильная УВ. Она деформирует шары и увлекает их в направлении своего движения.

Вопрос о многослойных зеркалах изучен в выполненной в рамках данного проекта РФФИ работе

[1.7-11+12] .

В соответствии с планом начато решение трудной задачи о моделировании диспергирования капель олова с добавкой иридия. Это практически важная и теоретическая сложная задача. За отчетный период подготовлены SPH программы для ее решения (SPH – smooth particle hydrodynamics). Начато численное моделирование. Используется разработанная нами мощная многопроцессорная версия SPH-кода [22-доп,23-доп,24-доп]. Это позволяет на высокопроизводительных кластерах доводить число SPH частиц до миллиарда. С таким числом частиц можно описывать в деталях сложные трехмерные процессы.

Проблемы связаны именно с геометрической сложностью задачи. Скин-слой жидкой оловянной капли, подаваемой из дозатора, составляет около 20 нм. Зона прогрева после воздействия ультракороткого импульса на каплю имеет толщину около 100 нм, когда волна сжатия покидает слой прогрева. При этом радиус капли 50 мкм – на три порядка превышает толщину волны сжатия. Чтобы решать такую задачу «насквозь», с самого начала полагая хотя бы 10 SPH-частиц на слой, необходимо 1000 миллиардов частиц – $(10^4)^3$. Из-за поляризации излучения лазерного импульса, дробящего каплю на мельчайшие фрагменты, имеются заметные 3D эффекты. Чтобы обойти эти проблемы, используется осесимметричное приближение. Расчет ведется поэтапно. С мелкими частицами проходим стадию начального лазерного энерговклада и достижения треугольной ударной волны (УВ, волна сжатия быстро трансформируется в такую УВ) продвижения вглубь сферической капли на 4 мкм (этап 1). Затем финальные данные этапа 1 огрубляются и используются уже как начальные данные этапа 2. К настоящему времени эти расчеты не окончены.

Выполнены предварительные расчеты, представленные ниже (подробнее с иллюстрациями см. приложенный п. 1.6 файл).

Моделирование абляции капли олова проводилось в следующей постановке. Задавалась сфера из 40 млн SPH-частиц диаметром 100 мкм. Со стороны левой полусферы в тонком слое толщиной 1 мкм частицам придавалась скорость 5 км/с по направлению к центру капли. Это приводит к формированию ударного импульса, аналогичного лазерному воздействию. Уравнение состояния олова задавалось в форме Ми-Грюнайзена (с линейной зависимостью скорости ударной волны от массовой скорости $u_s = c + au_p$) с параметрами, приведенными в табл. 1:

Нормальная плотность ρ_0 (кг/м ³)	7289
Параметр Грюнайзена γ	1.7
Парметр c (км/с)	2.59
Параметр a	1.49
Откольная прочность σ (ГПа)	1

Уточнена программа одномерных двухтемпературных гидродинамических вычислений (1D-2T-ND). Создана программа построения рентгеновских изображений. Эта программа позволяет строить изображения на ПЗС матрице интерферограмм, картины с кольцами Ньютона. Примеры представлены на рисунках 15 и 16 в приложенном п. 1.6 файле.

По полученным данным и сравнениям с опытами готовится публикация.

В работе [1.7-11+12] изучены вопросы перемещения и разделения веществ при воздействии остросфокусированного импульса жесткого (10-20 кэВ) рентгена на 2-х и более слойные покрытия из чередующихся разных веществ. См. также раздел А2 выше..

Выполнен эксперимент и его теоретическое сопровождение по созданию наноструктур на поверхности многослойной пленки из слоев хрома и золота при облучении такой многослойной пленки оптическим вихрем рентгеновского диапазона, плотно сжатым в двумерном пространстве координат и во временной области путем сильной фокусировки импульса рентгеновского лазера

на свободных электронах. Для создания рентгеновского вихря использовалась френелевская зонная пластинка, создающая малую интенсивность в центре сфокусированного пучка. В качестве составных частей многослойной пластинки были выбраны два элемента (золото и хром), имеющие разные пороги абляции. Это дало дополнительную возможность исследовать перераспределение компонентов мишени в процессе лазерной абляции. Выполнение экспериментов сопровождалось молекулярно-динамическим моделированием воздействия излучения на многослойную пленку. В результате экспериментов в лазерном пятне на мишени при энергии фотона лазера 7.71 кэВ в центре оптического вихря было обнаружено возникновение острых игл с типичными шириной и высотой 300 и 600 нм (рис. 17 в приложенном п. 1.6 файле). Наблюдаемая ширина превышает предел дифракции, но полученные наноструктуры являются наименьшими из всех, когда-либо зарегистрированных при абляции под действием интенсивного излучения лазеров на свободных электронах. Обнаружено, что элементный состав нано-игл значительно отличается от исходного состава многослойной пленки Cr / Au (рис. 18 в приложенном п. 1.6 файле). Все эти результаты хорошо объяснены выполненным нами молекулярно-динамическим моделированием (рис. 19 в приложенном п. 1.6 файле). Подготовлена статья [1.7-11+12], см. также раздел A2 выше.

Работа по пункту [C] тесно связана с подготовкой одномерного двухтемпературного гидродинамического кода 1D-2T-HD, который учитывает наши последние данные по электронному вкладу, и с программами построения рентгеновских изображений, см. предыдущий раздел. Данные по электронному вкладу в теплоемкость и давление находятся с помощью квантово-механических вычислений состояний двухтемпературной конденсированной среды. Такие состояния возникают при воздействии ультракороткого лазерного импульса. Для вычислений нами применяются DFT (Density Functional Theory) коды VASP, Elk и др. С их помощью получен электронный вклад в энергию и давление золота и молибдена в двухтемпературной ситуации. Полученные результаты будут использованы в коде 1D-2T-HD совместно с программой построения оптической интерференционной картины от подвергнутой абляционным изменениям поверхности металла.

[D] В рамках гранта РФФИ выполнены работы [1.7-14+15,17] о взаимодействии поляризованного света с малыми частицами. Аккуратное решение проблемы о взаимодействии света с частицами состоит из двух одинаково важных частей. Во-первых, необходимо вычислить сечение взаимодействия, поскольку оно определяет величину поглощенной энергии и ее распределение по частице. Работа [1.7-14] как раз посвящена исследованию поглощения излучения различной мультипольности малыми частицами в зависимости от их размеров, формы и комплексной диэлектрической проницаемости материала частицы. Во-вторых, требуется промоделировать теплофизический и гидродинамический отклик частицы на лазерное воздействие. Результаты работ по первой части проблемы, выполненные за 2017 год в рамках гранта РФФИ 14-19-01599, представлены в статьях, приняты в печать в PRL работы [1.7-14+15,17].

Параллельно в течение года строилось решение второй части проблемы ([E]). Оно описано выше в разделе B, см. рис. 13 и 14 в приложенном п. 1.6 файле.

[F] Важнейшим является вопрос о механизмах формирования наночастиц при лазерной абляции металлической мишени в жидкость. Лазерный метод получения чистых (по сравнению с химическими методами) кристаллических наночастиц (НЧ) востребован в технологиях. В то же время понимания того, как протекают процессы образования НЧ, до сих пор нет. Недавно (2017

год) появился весьма подробный (454 ссылки, 59 иллюстраций) обзор китайских авторов по данной теме [25-доп] (open access). В этом обзоре отлично проиллюстрированы приложения в технологиях, плазмонике, сенсорах и биомедицине.

Здесь для нас важно то, что данный обширнейший обзор показывает положение дел в мировой науке в направлении осмысления ситуации, в смысле развития теории, моделирования и понимания. Из 59 рисунков и 454 цитирований лишь один рисунок 11 и ссылка 120 имеют отношение к моделированию процессов на самой главной ранней стадии (работа 120 выполнена в простейшей постановке для ультратонкой пленки 20 нм. Мы рассматриваем [(1.7-6,9) гораздо более важную для приложений ситуацию с объемной мишенью). На ранней стадии мы стартуем с условий: металл-жидкость. Причем контактирующие вещества разделены границей, развалить которую для формирования НЧ очень непросто. Всё остальное в статье [25-доп] – это про поздние стадии, про формирование, расширение и последовательные схлопывания кавитационного пузырька, про уравнение Релея-Рябушинского-Плессета и т.п. Данные разделы относятся к достаточно разработанной области науки, примыкающей к сонолюминесценции. В этой области науки исследователи проводят эксперименты и получают данные наподобие эволюций, показанных на рис. 7 и 8 статьи [25-доп]. А осмысление сводится к рис. 6 статьи [25-доп], который носит исключительно качественный и грубый характер.

В опытах исследователи видят пузырьки. Но это поздние стадии – субмикросекунды и позже. Между тем дробление на НЧ или конденсация в НЧ и захват НЧ в жидкость происходят на стадии субнаносекунд, которую исследователи не в состоянии обнаружить в опытах и до сих пор плохо понимают. Наша работа нацелена именно на преодоление данного разрыва в понимании. Спрашивается, как отрываются и попадают в жидкость НЧ. Как они оказываются внутри парового (пары жидкости) пузырька.

Работа ведется, начиная с 2015 г., и состоит из ряда этапов. На первых этапах был разработан межатомный потенциал воды, см. рис. 17. На этапе 2017 года этот потенциал был усовершенствован для конкретных расчетов абляции золота в воду. Добавлен потенциал взаимодействия золото-вода отталкивательного характера, поскольку поверхностное натяжение золота намного превышает поверхностное натяжение воды. Потенциал золото-золото был создан в нашей группе и опубликован в статье Жаховского и др. 2009 года [26-доп]. ЕАМ потенциал Au [26-доп] апробирован в наших предыдущих работах, а также применяется другими авторами в их собственных вычислениях.

С указанными потенциалами выполнены расчеты абляции золото/вода с помощью крупномасштабной молекулярной динамики (МД) в комбинации с описанием механизма теплопроводности с помощью блока Монте-Карло (МК). Результаты моделирования описаны в двух статьях [1.7-6,9]. Одна статья принята для публикации [1.7-6], другая 1.7-9 направлена в журнал *Matter and Radiation at Extremes - Journal - Elsevier*. Результаты МД-МК подхода дополнены расчетами с помощью двухтемпературного гидродинамического (2Т-ГД) кода [1.7-6,9]. В 2Т-ГД применяются двухтемпературная физика, широкодиапазонное уравнение состояния золота и аппроксимация адиабаты воды.

[G] За отчетный период удалось создать потенциалы межатомного взаимодействия олова с существенно разными значениями коэффициента поверхностного натяжения. Как говорилось, они требуются для скейлинга требований к объему молекулярно-динамических (МД) вычислений в сторону снижения этих требований. Поясним вкратце, см. подробности о приемах скейлинга при МД моделировании в работах [1,27-доп,2-доп]. Имеются безразмерные числа и теория подобия по ним. Важным является капиллярное число. Подсчитаем радиус частицы в капиллярных масштабах. В эксперименте берем радиус частицы и коэффициент поверхностного натяжения,

потом подсчитываем радиус частицы в капиллярных масштабах. В МД симуляции для уменьшения размера применяем межатомный потенциал с уменьшенным коэффициентом поверхностного натяжения. Тогда эквивалентный в смысле теории подобия размер частицы в МД получается меньше, чем в эксперименте. Причем в 3D геометрии отношение входит в кубе. За счет этого обеспечивается выигрыш в параметрах расчета.

Для исследования влияния поверхностного натяжения на кавитацию и фрагментацию мы разработали два межатомных потенциала для жидкого олова, которые имеют разные поверхностные натяжения. Олово, моделируемое с использованием потенциала EAM1, профили плотности и напряжения сдвига в пленке которого показаны сплошными линиями на рисунке 18, имеет поверхностное натяжение 0.59 J/m², что очень близко к экспериментальной величине 0.525 J/m². Олово EAM2, профили которого показаны штриховыми линиями, имеет поверхностное натяжение 0.133 J/m², что почти в 4 раза меньше. Вследствие слегка более высокого теплового расширения олово EAM2 имеет слегка меньшую плотность жидкости в точке плавления. Несмотря на то, что потенциалы имеют разные поверхностные свойства, их парные, зарядовые функции, энергии погружения различны – тем не менее, они демонстрируют идентичную реакцию на деформацию, как указывают холодные кривые давления на рис. 19 в приложенном п. 1.6 файле. Такая механическая идентичность EAM1 и EAM2 неудивительна, так как она закладывалась в процедуру подгонки. Это позволяет наблюдать различия в процессе фрагментации при одинаковых размерах, ударных нагрузках и волнах растяжения.

Дополнительная литература

- [1-доп] (open access) A. A. Kuchmizhak et al., Plasmon-mediated Enhancement of Rhodamine 6G Spontaneous Emission on Laser-spalled Nanotextures, *Physics Procedia* (December 2017) 86:66-71
- [2-доп] (open access) Inogamov et al. Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse, *Nanoscale Research Letters* (2016) 11:177. DOI 10.1186/s11671-016-1381-1
- [3-доп] (open access) Urs Zywiets et al., Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses, *NATURE COMMUNICATIONS* (2014) | 5:3402 | DOI: 10.1038/ncomms4402
- [4-доп] V. Sametoglu et al., Production of 70-nm cr dots by laser-induced forward transfer, *Optics Express* (2013) 21, 18525-31.
- [5-доп] R. Pohl et al., Imaging of the Ejection Process of Nanosecond Laser-induced forward Transfer of Gold, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* (2015) Vol. 10, No. 2
- [6-доп] M. Zenou, A. Sa'Ar, and Z. Kotler, Laser jetting of femto-liter metal droplets for high resolution 3D printed structures, *Scientific Reports* (2015) 5, 17265.
- [7-доп] C.W. Visser et al., Toward 3d printing of pure metals by laser-induced forward transfer, *Advanced Materials* (2015) 27, 4087-4092.
- [8-доп] (open access) Qingfeng Li et al., Generating liquid nanojets from copper by dual laser irradiation for ultra-high resolution printing, *Optics Express* (October 2017) 25, No. 20, 24164-72.
- [9-доп] Qingfeng Li et al., Laser-induced nano-jetting behaviors of liquid metals, *Applied Physics A* (October 2017) 123 (11), 718. DOI10.1007/s00339-017-1308-4 2017.
- [10-доп] (open access) J.P. Padilla-Martinez et al., Controllable direction of liquid jets generated by thermocavitation within a droplet, *Applied Optics* (September 2017) Vol. 56, No. 25, 7167-7173.
- [11-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, S.I. Ashitkov, Yu.V. Petrov, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, K. Nishihara, V.E. Fortov, *J. Experim. Theor. Phys. (JETP)* (2008) 107, No. 1, pp. 1-19.
- [12-доп] B.J. Demaske, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, I.I. Oleynik, *Phys. Rev. B* (2010) 82, 064113.
- [13-доп] G.E. Norman, S.V. Starikov, and V.V. Stegailov, *J. Experim. Theor. Phys. (JETP)* (2012) 114, No. 5, pp. 792-800.

- [14-доп] Ishikawa, T. et al., A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region, *Nat. Photon.* (2012) 6, 540-544.
- [15-доп] Kretschmann, E.; Raether, H. Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light, *Z. Naturforsch.* (1968) 23a, 2135–2136.
- [16-доп] V.V. Temnov, Ultrafast acousto-magneto-plasmonics, *Nat. Phot.* (2012) Vol. 6, 728-736. DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.220
- [17-доп] Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, K.V. Khishchenko, and S.I. Anisimov, Reflectance of thin silver film on the glass substrate at the interaction with femtosecond laser pulses, *J. Phys.: Conf. Ser.* (2016) 774, 012099. doi:10.1088/1742-6596/774/1/012099
- [18-доп] A.K. Upadhyay, N.A. Inogamov, B. Rethfeld, H.M. Urbassek, Ablation by ultrashort laser pulses: Atomistic and thermodynamic analysis of the processes at the ablation threshold, *Phys. Rev. B* (2008) 78, 045437 [10 pages].
- [19-доп] S.I. Ashitkov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskiy, Yu.N. Emirov, M.B. Agranat, I.I. Oleinik, S.I. Anisimov, and V.E. Fortov, Formation of Nanocavities in Surface Layer of Aluminum Target irradiated by Femtosecond Laser Pulse, *JETP Lett.* (2012) v. 95(4), 176-181.
- [20-доп] A.A. Kuchmizhak, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, A.A. Rudenko, Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, and T.V. Efimov, Flash-imprinting of intense femtosecond surface plasmons for advanced nanoantenna fabrication, *Opt. Lett.* (2015) Vol. 40, No. 8, 1687-1690.
- [21-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, and V.A. Khokhlov, Jet Formation in Spallation of Metal Film from Substrate under Action of Femtosecond Laser Pulse, *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)* (2015) 120(1), 15-48.
- [22-доп] M.S. Egorova, S.A. Dyachkov, A.N. Parshikov, V.V. Zhakhovskiy, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains, Preprint submitted to *Journal of Computational Physics*, October 2017.
- [23-доп] Dyachkov, S.A.; Egorova, M.S.; Murzov, S.A.; Parshikov, A.N.; Zhakhovskiy V.V., Auto-balancing algorithm for parallel SPH simulation of materials in extremes, *Lobachevskii Journal of Mathematics* (September 2017), Vol. 38, Issue: 5 Pages: 893-897. DOI: 10.1134/s1995080217050092
- [24-доп] M.S. Egorova, S.A. Dyachkov, A.N. Parshikov, V.V. Zhakhovskiy, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains, *Computer Physics Communication* (in preparation)
- [25-доп] (open access) J. Xiao, P. Liu, C.X. Wang, G.W. Yang, External field-assisted laser ablation in liquid: An efficient strategy for nanocrystal synthesis and nanostructure assembly, *Progress in Materials Science* (2017) v. 87, 140-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.02.004>
- [26-доп] V.V. Zhakhovskii, N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, S.I. Ashitkov, K. Nishihara, Molecular dynamics simulation of femtosecond ablation and spallation with different interatomic potentials, *Appl. Surf. Sci.* (2009) v. 255(24), 9592-9596.
- [27-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskiy, K.P. Migdal, Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump, *Applied Physics A: Material Science and Processing* (2016) v. 122, 432 (9 pages). DOI 10.1007/s00339-016-9942-9

Все планируемые на год работы выполнены полностью:

да

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

A1. (Это пункт 1 в разделе А плана) Выполнена большая работа совместно с группой экспериментаторов из (i) австралийских центров микрофотоники и нанофабрикации, (ii) группы дальневосточных научных организаций и (iii) ФИАНа, ИТМО СПб. при теоретических и численных исследованиях по гранту сотрудников ВНИИА им. Н.Л. Духова и нашего Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау, головного по проекту. В работе [1.7-3] (публикация 3 в списке публикаций

за год по результатам проекта, приложенных к отчету (имеются pdf), пункт 1.7), нацеленной на управляемое создание оптимальных поверхностных структур субволновых размеров с искусственно созданной нужной диэлектрической проницаемостью, проделано крупномасштабное численное моделирование. Моделированием показано, что сверхбыстрое (длительность импульса 230 фс) выделение лазерной энергии в пленках металлов индуцирует быстрое плавление и движение расплава, влекущее сложное перераспределение вещества пленки на наномасштабах, сохраняющееся после рекристаллизации горячего расплава. Плавление-переток-кристаллизация формируют морфологию структур на рис. 1 в [1.7-3] и приложенном п. 1.6 файле. Морфологические нанохарактеристики структур (диаметр, кривизна купола, застывшая струя в вершине, капля на струе и др.) сильно влияют на оптический отклик при плазмонном зондировании. Это позволяет применять полученные массивы структур в нелинейных оптических приложениях [1-доп]. При моделировании учитывались все физические процессы, связанные с поглощением лазерной энергии, электрон-ионным энергетическим обменом, акустической релаксацией и гидродинамическим движением [1.7-3]. Был применен комбинированный теоретический подход, основанный на разделении относительно медленного гидродинамического движения пленки и быстрых физических процессов, определяющих сепарацию пленки от подложки. Мы сочетали двухтемпературные расчеты (на ранней стадии электроны намного горячее ионов), молекулярно-динамическое моделирование и полуаналитическую модель тонких оболочек.

Проведен всесторонний анализ влияния толщины пленки на динамику при лазерном воздействии различной длительности от десятков фемтосекунд до субнаносекундного диапазона [1.7-5]. Решение этой проблемы существенно для технологий лазерного переноса вещества (LIFT/LIBT – laser induced forward/backward transfer, лазерная печать). Имеется пространственный масштаб, равный глубине прогрева лазером. В тонких пленках толщина мала по сравнению с этим масштабом. Наоборот, толщина толстой пленки существенно его превосходит. В работах по гранту РНФ [1.7-3, 10, 19] детально изучена динамика тонких металлических пленок, однородно прогреваемых лазерным импульсом, как свободно висящих и испытывающих незатухающие акустические колебания при малых поглощенных флюенсах, так и пленок на подложке, в которых эти колебания затухают из-за возбуждения звуковых волн в подложке, и испытывающих отрыв части пленки при повышении флюенса. В работе [1.7-5] подробно рассмотрены явления, происходящие при воздействии на толстую пленку. Анализ этих явлений позволяет понять, что происходит в опытах [7-доп – 9-доп], в которых авторы приводят только данные экспериментов и качественные рассуждения.

A2. В рамках работы над проектом выполнена работа по моделированию воздействия рентгеновского оптического вихря на многослойную мишень [1.7-11+12]. Понято явление формирования центрального заострения в окрестности центра, где интенсивность воздействия близка к нулю [1.7-11+12]. До этой работы воздействие световыми вихрями изучалось только с применением лазеров инфракрасного и оптического диапазонов. Работа выполнялась совместно с экспериментаторами из Японии [1.7-11]. В ней лазерный фемтосекундный импульс жесткого (7.71 кэВ) рентгена излучался из XFEL – x-ray free electron laser SACLA [14-доп]. Рассматривались как однослойные, так и многослойные мишени. В многослойном случае крупномасштабное численное моделирование было проведено для пяти чередующихся слоев золота и хрома, напыленных на кремниевую подложку. Воздействие импульса с распределением интенсивности оптического вихря приводит к формированию тороидальной оболочки из расплавленных металлов. Решающим (для формирования заострения в центре) оказывается действие капиллярного натяжения во внутреннем кольце тороида. Оно приводит к стягиванию внутреннего кольца к оси, превращению его в трубку и сжатию трубки в центральную колонкообразную затвердевшую структуру [1.7-11+12].

В работах [1.7-2, 6, 8] по проекту было изучено формирование чрезвычайно острых игл при фокусировке в ограниченное дифракцией малое пятно на пленке. Иглы имеют радиус скругления в

вершине в единицы нанометров. Такие иглы могут применяться, например, как концентраторы электрического поля на вершине. Найдено, что в окрестности заострения возникают необычные кристаллические формы с 5-кратной симметрией (икосаэдр) [1.7-2,6].

А3. Гидродинамическое и молекулярно-динамическое моделирование поведения пленок металла под действием фемтосекундных лазерных импульсов в зависимости от поглощенного флюенса применено для исследования задач со сложным электромагнитным (ЭМ) полем, решаемых совместно с решением задачи о теплофизическом и динамическом отклике мишени на воздействие лазерного импульса, где рассматриваются двухтемпературные явления (электроны горячее ионов, выравнивание температур), плавление, испарение, рекристаллизация, динамика перетока вещества мишени с учетом инерции, капиллярных сил и давления паров. В разделе А3 сложное поле создается за счет интерференции плазмон-поляритонной (ППР) моды и падающей ЭМ волны. Проблема является весьма актуальной для современной плазмоники при создании периодических структур на поверхности металла. Нами рассмотрено в одном варианте образование периодических структур вследствие выделения энергии от интерференции лазерного излучения на поверхности пленки и поверхностной плазмон-поляритонной моды в ней в геометрии Кречмана. В другом варианте периодическая гофрировка поверхности металла создается тем, что лазерный импульс воздействует на уединенную структуру на металлической пленке (эта структура создается предварительно остросфокусированным импульсом на пленке). Гофрировка возникает из-за интерференции поверхностной плазмонной волны от уединенной структуры с полем лазерного излучения. Проведено моделирование, которое определяет длину волны плазмонной моды (около 400 нм) и глубину модуляции максимум/минимум стоячей волны (десятки процентов). Эти данные похожи на те, которые соответствуют первому варианту. Выполнено теплофизическое/гидродинамическое моделирование с помощью метода тонких пленок (см. [21-доп]) и крупномасштабной молекулярной динамики (МД). В деталях промоделировано развитие гофрировки на стадии капиллярного торможения пленки и ее рекристаллизации. Ранее ни метод тонких пленок, ни МД не применялись для задач с периодической гофрировкой.

А4. За отчетный год в приближении тонкой пленки создана программа [21-доп] для решения задач с наносекундными лазерными импульсами. В версии [21-доп] учитывались инерция пленки и поверхностное натяжение. Теперь добавлена, во-первых, теплопроводность, учитывающая растекание тепла по пленке. В настоящий момент в программе с теплопроводностью (ПТ-блок) не учитывается изменение формы пленки при движении. Тепло растекается по плоской двумерной пленке; потерями на испарение и отводом тепла в подложку пренебрегаем, это справедливо в случае подложек с низкими значениями коэффициента теплопроводности. ПТ-блок нужен нам для оценки темпа остывания пленки. Во-вторых, учтена зависимость давления насыщенного пара металла пленки от температуры. На каждом временном шаге берем из ПТ-блока наибольшую температуру по пленке – в вершине нанобампа – и находим по этой температуре давление насыщенного пара под куполом нанобампа. Проведена серия вычислений в таком приближении. Показано, что пленка отделяется от подложки за счет давления насыщенного пара. Первоначально паровая прослойка возникает в области контакта между пленкой и подложкой. Далее пар ускоряет пленку, и на ней образуется купол. Картина оказывается схожей со случаем ультракоротких импульсов, когда отделение пленки и ее полет по инерции связаны с короткой стадией механического отталкивания пленки от подложки. Далее пленка при наносекундном воздействии постепенно остывает из-за теплоотвода на периферию, давление пара, из-за которого растет купол, сильно падает и становится динамически несущественным. На первый план выходит капиллярное торможение.

[В]. Исследована задача о последствиях воздействия субнаносекундного (600 пс) оптического лазерного импульса на пленку 3-5 мкм железа или тантала и диагностики результатов воздействия с помощью ультракороткого (единицы фс) жесткого (10-20 кэВ) лазерного импульса XFEL (X-ray

Free Electron Laser). Результаты опубликованы в статье [1.7-1]. Выполнен важный цикл исследований в области лазерной генерации ударных волн вместе с исследованиями по распространению УВ [1.7-4,13,16]. Очень интересные результаты получены в работах [1.7-4,16]. Они относятся к моделированию распространения УВ в прочных керамиках наподобие карбида бора и др. Показано, что методика SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) в нашей многопроцессорной реализации позволяет с высокой точностью описывать многоэтапный процесс разрушения керамики. Результаты хорошо согласуются с измерениями, а также с одномерными численными расчетами. Но в отличие от таких расчетов, мы видим внутреннюю структуру волн разрушения (см. рис. В.1). В работе [1.7-13] проанализировано прохождение сильной ударной волны через взвесь жидкости и сферических металлических частиц. Показано, что ударная волна деформирует частицы и увлекает их в направлении своего движения. Вопрос о многослойных зеркалах изучен в выполненной в рамках данного проекта РФФ работе [1.7-11+12].

В соответствии с планом начато решение трудной задачи о моделировании диспергирования капель олова с добавкой иридия. Это практически важная и теоретически сложная задача. За отчетный период подготовлены SPH-программы для ее решения. Начато численное моделирование. Используется разработанная нами мощная многопроцессорная версия SPH-кода [22-доп,23-доп,24-доп]. Это позволило на высокопроизводительных кластерах доводить число SPH частиц до миллиарда. С таким числом частиц можно описывать в деталях сложные трехмерные процессы. Проблемы связаны именно с геометрической сложностью задачи. Скин-слой жидкой оловянной капли, подаваемой из дозатора, составляет около 20 нм. Зона прогрева после воздействия ультракороткого импульса на каплю имеет толщину около 100 нм, когда волна сжатия покидает слой прогрева. При этом радиус капли - 50 мкм – на три порядка превышает толщину волны сжатия. Чтобы решать такую задачу «насквозь», полагая с самого начала хотя бы 10 SPH-частиц на слой, необходимо 1000 миллиардов частиц – $(10^4)^3$. Из-за поляризации излучения лазерного импульса, дробящего каплю на мельчайшие фрагменты, имеются заметные 3D эффекты. Чтобы обойти эти проблемы, используется осесимметричное приближение. Расчет ведется поэтапно. С мелкими частицами проходим стадию начального лазерного энерговклада и достижения треугольной ударной волной (УВ, волна сжатия, быстро трансформируется в такую УВ) продвижения вглубь сферической капли на 4 мкм (этап 1). Затем финальные данные этапа 1 огрубляются и используются уже как начальные данные этапа 2. В таком осесимметричном приближении выполнены предварительные расчеты моделирования абляции капли олова. Уточнена программа одномерных двухтемпературных гидродинамических вычислений (1D-2T-HD). Создана программа построения рентгеновских изображений. Она позволяет строить изображения на ПЗС матрице интерферограмм, картины с кольцами Ньютона.

Работа по пункту [С] тесно связана с подготовкой кода 1D-2T-HD, который учитывает наши последние данные по электронному вкладу, и с программами построения рентгеновских изображений, см. предыдущий раздел. Электронный вклад в теплоемкость и давление находится с помощью квантово-механических вычислений состояний двухтемпературной конденсированной среды, возникающих при воздействии ультракороткого лазерного импульса. Для вычислений нами применяются DFT (Density Functional Theory) коды VASP, Elk и др.

[D] В рамках гранта РФФ выполнены и приняты в печать в PRL работы [1.7-14+15,17] о взаимодействии поляризованного света с малыми частицами. Аккуратное решение проблемы о взаимодействии света с частицами состоит из двух одинаково важных частей. Во-первых, необходимо вычислить сечение взаимодействия, поскольку оно определяет величину поглощенной энергии и ее распределение по частице. Работа [1.7-14] как раз посвящена исследованию поглощения излучения различной мультипольности малыми частицами в зависимости от их размеров, формы и комплексной диэлектрической проницаемости материала

частицы. Во-вторых, требуется промоделировать теплофизический и гидродинамический отклик частицы на лазерное воздействие. Результаты работ по первой части проблемы, выполненные за 2017 год в рамках гранта РФФИ 14-19-01599, представлены в статьях (выполнены и приняты в печать в PRL работы [1.7-14+15,17]). Параллельно в течение года строилось решение второй части проблемы ([E]). Оно описано выше в разделе В.

[F] Важнейшим является вопрос о механизмах формирования наночастиц при лазерной абляции металлической мишени в жидкость. Лазерный метод получения чистых (по сравнению с химическими методами) кристаллических наночастиц (НЧ) востребован в технологиях. Рассмотрена задача об абляции золота в воду и проделана большая работа по определению межмолекулярных и межатомных потенциалов в этой смеси. Работа ведется, начиная с 2015 г., и состоит из ряда этапов. На первых этапах был разработан межатомный потенциал воды. На этапе 2017 года этот потенциал был усовершенствован для конкретных расчетов абляции золота в воду. Добавлен потенциал взаимодействия золото-вода отталкивательного характера, поскольку поверхностное натяжение золота намного превышает поверхностное натяжение воды. Потенциал золото-золото был создан в нашей группе и опубликован в статье Жаховского и др. 2009 года [26-доп]. ЕАМ потенциал Au [26-доп] апробирован в наших предыдущих работах, а также применяется другими авторами в их собственных вычислениях.

С указанными потенциалами выполнены расчеты абляции золото/вода с помощью крупномасштабной молекулярной динамики (МД) в комбинации с описанием механизма теплопроводности с помощью блока Монте-Карло (МК). Результаты моделирования описаны в двух статьях [1.7-6,9]. Одна статья принята для публикации [1.7-6], другая [1.7-9] направлена в журнал *Matter and Radiation at Extremes - Journal - Elsevier*. Результаты МД-МК подхода дополнены расчетами с помощью двухтемпературного гидродинамического (2Т-ГД) кода [1.7-6,9], где применяются двухтемпературная физика, широкодиапазонное уравнение состояния золота и аппроксимация адиабаты воды. С помощью проведенных расчетов показано, как отрываются и попадают в жидкость НЧ, как они оказываются внутри парового (пары жидкости) пузырька.

[G] За отчетный период удалось создать потенциалы межатомного взаимодействия олова с существенно разными значениями коэффициента поверхностного натяжения. Они требуются для скейлинга требований к объему молекулярно-динамических (МД) вычислений в сторону снижения этих требований. Эквивалентный в смысле теории подобия по отношению к капиллярному числу размер частицы в МД получается меньше, чем в эксперименте, если для моделирования применить межчастичный потенциал, дающий уменьшенный коэффициент поверхностного натяжения. Причем в 3D геометрии уменьшение размера входит в кубе. За счет этого обеспечивается выигрыш в параметрах расчета. Для исследования влияния поверхностного натяжения на кавитацию и фрагментацию мы разработали два межатомных потенциала для жидкого олова, которые имеют разные поверхностные натяжения. Олово, моделируемое с использованием потенциала ЕАМ1, имеет поверхностное натяжение 0.59 J/m², что очень близко к экспериментальной величине 0.525 J/m². Олово ЕАМ2 имеет поверхностное натяжение 0.133 J/m², что почти в 4 раза меньше. Вследствие слегка более высокого теплового расширения олово ЕАМ2 имеет слегка меньшую плотность жидкости в точке плавления. Несмотря на то, что потенциалы имеют разные поверхностные свойства, их парные, зарядовые функции, энергии погружения различны – тем не менее, они демонстрируют идентичную реакцию на деформацию. Такая механическая идентичность ЕАМ1 и ЕАМ2 не удивительна, так как она закладывалась в процедуру подгонки. Это позволяет наблюдать различия в процессе фрагментации при одинаковых размерах, ударных нагрузках и волнах растяжения.

Дополнительная литература

[1-доп] (open access) A. A. Kuchmizhak et al., Plasmon-mediated Enhancement of Rhodamine 6G

- Spontaneous Emission on Laser-spalled Nanotextures, *Physics Procedia* (December 2017) 86:66-71
[2-доп] (open access) Inogamov et al. Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse, *Nanoscale Research Letters* (2016) 11:177. DOI 10.1186/s11671-016-1381-1
- [3-доп] (open access) Urs Zywiets et al., Laser printing of silicon nanoparticles with resonant optical electric and magnetic responses, *NATURE COMMUNICATIONS* (2014) | 5:3402 | DOI: 10.1038/ncomms4402
- [4-доп] V. Sametoglu et al., Production of 70-nm cr dots by laser-induced forward transfer, *Optics Express* (2013) 21, 18525-31.
- [5-доп] R. Pohl et al., Imaging of the Ejection Process of Nanosecond Laser-induced forward Transfer of Gold, *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* (2015) Vol. 10, No. 2
- [6-доп] M. Zenou, A. Sa'Ar, and Z. Kotler, Laser jetting of femto-liter metal droplets for high resolution 3D printed structures, *Scientific Reports* (2015) 5, 17265.
- [7-доп] C.W. Visser et al., Toward 3d printing of pure metals by laser-induced forward transfer, *Advanced Materials* (2015) 27, 4087-4092.
- [8-доп] (open access) Qingfeng Li et al., Generating liquid nanojets from copper by dual laser irradiation for ultra-high resolution printing, *Optics Express* (October 2017) 25, No. 20, 24164-72.
- [9-доп] Qingfeng Li et al., Laser-induced nano-jetting behaviors of liquid metals , *Applied Physics A* (October 2017) 123 (11), 718. DOI10.1007/s00339-017-1308-4 2017.
- [10-доп] (open access) J.P. Padilla-Martinez et al., Controllable direction of liquid jets generated by thermocavitation within a droplet, *Applied Optics* (September 2017) Vol. 56, No. 25, 7167-7173.
- [11-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, S.I. Ashitkov, Yu.V. Petrov, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, K. Nishihara, V.E. Fortov, *J. Experim. Theor. Phys. (JETP)* (2008) 107, No. 1, pp. 1-19.
- [12-доп] B.J. Demaske, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, I.I. Oleynik, *Phys. Rev. B* (2010) 82, 064113.
- [13-доп] G.E. Norman, S.V. Starikov, and V.V. Stegailov, *J. Experim. Theor. Phys. (JETP)* (2012) 114, No. 5, pp. 792-800.
- [14-доп] Ishikawa, T. et al., A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region, *Nat. Photon.* (2012) 6, 540-544.
- [15-доп] Kretschmann, E.; Raether, H. Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light, *Z. Naturforsch.* (1968) 23a, 2135–2136.
- [16-доп] V.V. Temnov, Ultrafast acousto-magneto-plasmonics, *Nat. Phot.* (2012) Vol. 6, 728-736. DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.220
- [17-доп] Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, K.V. Khishchenko, and S.I. Anisimov, Reflectance of thin silver film on the glass substrate at the interaction with femtosecond laser pulses, *J. Phys.: Conf. Ser.* (2016) 774, 012099. doi:10.1088/1742-6596/774/1/012099
- [18-доп] A.K. Upadhyay, N.A. Inogamov, B. Rethfeld, H.M. Urbassek, Ablation by ultrashort laser pulses: Atomistic and thermodynamic analysis of the processes at the ablation threshold, *Phys. Rev. B* (2008) 78, 045437 [10 pages].
- [19-доп] S.I. Ashitkov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Yu.N. Emirov, M.B. Agranat, I.I. Oleinik, S.I. Anisimov, and V.E. Fortov, Formation of Nanocavities in Surface Layer of Aluminum Target irradiated by Femtosecond Laser Pulse, *JETP Lett.* (2012) v. 95(4), 176-181.
- [20-доп] A.A. Kuchmizhak, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, S.V. Makarov, A.A. Rudenko, Yu.N. Kulchin, O.B. Vitrik, and T.V. Efimov, Flash-imprinting of intense femtosecond surface plasmons for advanced nanoantenna fabrication, *Opt. Lett.* (2015) Vol. 40, No. 8, 1687-1690.
- [21-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, and V.A. Khokhlov, Jet Formation in Spallation of Metal Film from Substrate under Action of Femtosecond Laser Pulse, *Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP)* (2015) 120(1), 15-48.
- [22-доп] M.S. Egorova, S.A. Dyachkov, A.N. Parshikov, V.V. Zhakhovsky, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains, Preprint submitted to *Journal of Computational Physics*, October 2017.
- [23-доп] Dyachkov, S.A.; Egorova, M.S.; Murzov, S.A.; Parshikov, A.N.; Zhakhovsky V.V., Auto-balancing

algorithm for parallel SPH simulation of materials in extremes, Lobachevskii Journal of Mathematics (September 2017), Vol. 38, Issue: 5 Pages: 893-897. DOI: 10.1134/s1995080217050092

[24-доп] M.S. Egorova, S.A. Dyachkov, A.N. Parshikov, V.V. Zhakhovsky, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains, Computer Physics Communication (in preparation)

[25-доп] (open access) J. Xiao, P. Liu, C.X. Wang, G.W. Yang, External field-assisted laser ablation in liquid: An efficient strategy for nanocrystal synthesis and nanostructure assembly, Progress in Materials Science (2017) v. 87, 140-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.02.004>

[26-доп] V.V. Zhakhovskii, N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, S.I. Ashitkov, K. Nishihara, Molecular dynamics simulation of femtosecond ablation and spallation with different interatomic potentials, Appl. Surf. Sci. (2009) v. 255(24), 9592-9596.

[27-доп] N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, K.P. Migdal, Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump, Applied Physics A: Material Science and Processing (2016) v. 122, 432 (9 pages). DOI 10.1007/s00339-016-9942-9

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 РНФ

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

A1. Совместно с группой экспериментаторов из (i) австралийских центров микрофотоники и нанофабрикации, (ii) ряда дальневосточных научных организаций и (iii) ФИАНа, ИТМО СПб. при теоретических и численных исследованиях сотрудников ВНИИА им. Н.Л. Духова и головного по проекту Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау выполнена большая работа, нацеленная на управляемое создание оптимальных поверхностных структур субволновых размеров с искусственно созданной нужной диэлектрической проницаемостью. Крупномасштабным численным моделированием показано, что сверхбыстрое (длительность импульса 230 фс) выделение лазерной энергии в пленках металлов индуцирует быстрое плавление и движение расплава, в результате после рекристаллизации происходит сложное перераспределение вещества пленки на наномасштабах. Плавление-переток-кристаллизация формируют морфологию наноструктур. Морфологические нанохарактеристики структур (диаметр, кривизна купола, застывшая струя в вершине, капля на струе и др.) сильно влияют на оптический отклик при плазмонном зондировании. Это позволяет применять полученные массивы структур в нелинейных оптических приложениях. При моделировании применен комбинированный теоретический подход, основанный на разделении относительно медленного гидродинамического движения пленки и быстрых физических процессов, определяющих сепарацию пленки от подложки, учитывались все физические процессы, связанные с поглощением лазерной энергии, электрон-ионным энергетическим обменом, акустической релаксацией и гидродинамическим движением.

Проведен всесторонний анализ влияния толщины пленки на динамику при лазерном воздействии различной длительности от десятков фемтосекунд до субнаносекундного диапазона. Решение этой проблемы существенно для технологий лазерного переноса вещества (LIFT/LIBT – laser induced forward/ backward transfer, лазерная печать). Тонкими являются пленки, толщина которых мала по сравнению с глубиной прогрева лазером. Детально изучена динамика тонких металлических пленок, однородно прогреваемых лазерным импульсом, как свободно висящих и испытывающих незатухающие акустические колебания при малых поглощенных флюенсах, так и пленок на подложке, в которых эти колебания затухают из-за возбуждения звуковых волн в подложке. Исследована динамика отрыва части пленки при повышении флюенса как для тонких

пленок, так и для толстых пленок с толщиной, большей глубины прогрева.

A2. Выполнена работа по моделированию воздействия рентгеновского оптического вихря на многослойную мишень. Понято явление формирования центрального заострения в окрестности центра вихря, где интенсивность воздействия близка к нулю. До этого изучалось только воздействие световыми вихрями инфракрасного и оптического диапазонов. В работе, выполненной совместно с экспериментаторами из Японии, лазерный фемтосекундный импульс жесткого (7.71 кэВ) рентгена излучался из XFEL – x-ray free electron laser SACLA (Япония). Рассматривались как однослойные, так и многослойные мишени. В многослойном случае крупномасштабное численное моделирование было проведено для пяти чередующихся слоев золота и хрома, напыленных на кремниевую подложку. Воздействие вихревого импульса приводит к формированию тороидальной оболочки из расплава металлов. Капиллярное натяжение во внутреннем кольце тороида приводит к стягиванию внутреннего кольца к оси, превращению его в трубку и сжатию трубки в центральную колонкообразную затвердевшую структуру. Изучено формирование чрезвычайно острых игл при фокусировке лазерного пучка в ограниченное дифракцией малое пятно на пленке. Иглы имеют радиус скругления в вершине в единицы нанометров. Такие иглы могут применяться, например, как концентраторы электрического поля на своей вершине. Найдено, что в окрестности заострения возникают необычные кристаллические формы с 5-кратной симметрией (икосаэдр).

A3. Изучена актуальная для современной плазмоники проблема создания периодических структур на поверхности металла. Рассмотрено в одном варианте образование периодических структур вследствие выделения энергии от интерференции лазерного излучения на поверхности пленки и поверхностной плазмон-поляритонной моды в ней в геометрии Кречмана. В другом варианте периодическая гофрировка поверхности металла создается тем, что лазерный импульс воздействует на уединенную структуру на металлической пленке (эта структура создается предварительно остросфокусированным импульсом на пленке). Гофрировка возникает из-за интерференции поверхностной плазмонной волны от уединенной структуры с полем лазерного излучения. Проведено моделирование, которое определяет длину волны плазмонной моды (около 400 нм) и глубину модуляции максимум/минимум стоячей волны (десятки процентов). Выполнено гидродинамическое моделирование с помощью метода тонких пленок и крупномасштабная молекулярная динамика. В деталях промоделировано развитие гофрировки на стадии капиллярного торможения пленки и ее рекристаллизации. Ранее ни метод тонких пленок, ни МД не применялись для задач с периодической гофрировкой.

A4. Расчеты воздействия длинных (нс) импульсов.

В приближении тонкой пленки разработана программа для решения задач с длинными (наносекундными) лазерными импульсами. В программе, кроме инерции пленки и поверхностного натяжения, учтена теплопроводность, нужная для оценки темпа остывания пленки. Учтена зависимость давления насыщенного пара металла пленки от температуры. В серии вычислений в таком приближении показано, что пленка отделяется от подложки за счет давления насыщенного пара. Первоначально паровая прослойка возникает в области контакта между пленкой и подложкой. Далее пар ускоряет пленку, и на ней образуется купол. Картина оказывается схожей со случаем ультракоротких импульсов, когда отделение пленки и ее полет по инерции связаны с короткой стадией механического отталкивания пленки от подложки. При наносекундном воздействии пленка далее постепенно остывает из-за теплоотвода на периферию, падающее давление пара, из-за которого растет купол, становится динамически несущественным, на первый план выходит капиллярное торможение.

[B]. Исследована задача о последствиях воздействия субнаносекундного (600 пс) оптического лазерного импульса на пленку тантала и диагностики результатов воздействия с помощью ультракороткого (единицы фс) жесткого (10-20 кэВ) импульса лазера на свободных электронах. Показано, что совместное действие мощного оптического лазерного импульса (pump-импульса) и фемтосекундного импульса рентгеновского зондирующего излучения (probe-импульса), позволяет

обнаруживать динамику разрушения кристаллической решетки в пленке тантала при сверхвысокой скорости деформации $\sim 2 \times 10^8 - 3.5 \times 10^8$ 1/с. Использование метода рентгеновской дифракции в реальном времени, открывает путь к исследованию структуры вещества под напряжением и динамического разрушения материалов на атомном уровне. Используя этот метод, было непосредственно измерено максимальное снижение плотности от 8 до 10%, ассоциированное с началом откола в образце тантала и определена откольная прочность $\sim 16,8$ ГПа. Такая экспериментальная техника открывает новый путь для исследования явлений при сверхвысоких скоростях деформации в материалах на атомном масштабе, включая высокоскоростную динамику трещин и индуцированные напряжениями структурные переходы в твердых телах.

Выполнен важный цикл исследований в области лазерной генерации и распространения ударных волн. Они относятся к моделированию распространения ударных волн в прочных керамиках наподобие карбида бора и др. Показано, что использование программ SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) в нашей многопроцессорной реализации позволяет с высокой точностью описывать многоэтапный процесс разрушения керамики, видеть внутреннюю структуру волн разрушения.

Проанализировано прохождение сильной ударной волны через взвесь жидкости и сферических металлических частиц. Показано, что ударная волна деформирует частицы и увлекает их в направлении своего движения.

Начато решение практически важной и теоретически сложной задачи о моделировании диспергирования капель олова с добавкой иридия. За отчетный период подготовлены SPH-программы для ее решения. Начато численное моделирование. Используется разработанная нами мощная многопроцессорная версия SPH-кода. Это позволило на высокопроизводительных кластерах доводить число SPH-частиц до миллиарда, что позволяет в деталях описывать сложные трехмерные процессы. Проблемы связаны именно с геометрической сложностью задачи. Чтобы обойти эти проблемы, используется осесимметричное приближение. Расчет ведется поэтапно. С мелкими частицами проходит стадия начального лазерного энерговклада и достижения треугольной ударной волной продвижения вглубь сферической капли на 4 мкм (этап 1). Затем финальные данные этапа 1 огрубляются и используются уже как начальные данные этапа 2. В таком осесимметричном приближении выполнены расчеты моделирования абляции капли олова.

Создана программа построения рентгеновских изображений, позволяющая строить изображения на ПЗС матрице интерферометрической картины, получать кольца Ньютона при лазерной абляции.

[C] Проведено развитие программы одномерных двухтемпературных гидродинамических вычислений (1D-2T-HD) с учетом наших последних данных по электронному вкладу, и в связи с созданными программами построения рентгеновских изображений. Электронный вклад в теплоемкость и давление находится с помощью квантово-механических вычислений состояний двухтемпературной конденсированной среды, возникающих при воздействии ультракороткого лазерного импульса. Для вычислений применены DFT (Density Functional Theory) коды VASP, Elk и др.

[D] Выполнены работы о взаимодействии поляризованного света с малыми частицами. Проведено исследование поглощения излучения различной мультипольности малыми частицами в зависимости от их размеров, формы и комплексной диэлектрической проницаемости материала частицы.

[F] Важнейшим является вопрос о механизмах формировании наночастиц при лазерной абляции металлической мишени в жидкость. Рассмотрена задача об абляции золота в воду и проделана большая работа по определению межмолекулярных и межатомных потенциалов в этой смеси (золото-золото, вода-золото, вода-вода). С указанными потенциалами выполнены расчеты абляции золото/вода применением крупномасштабной молекулярной динамики в комбинации с

описанием механизма теплопроводности методом Монте-Карло, а также при помощи гидродинамического кода с использованием двухтемпературной физики, широкодиапазонного уравнения состояния золота и аппроксимации адиабаты воды. С помощью проведенных расчетов показано, как отрываются и попадают в жидкость наночастицы золота, как они оказываются внутри парового (пары жидкости) пузырька.

[G] За отчетный период удалось создать потенциалы межатомного взаимодействия олова с существенно разными значениями коэффициента поверхностного натяжения. Они требуются для скейлинга требований к объему молекулярно-динамических (МД) вычислений в сторону снижения этих требований. Эквивалентный в смысле теории подобия по отношению к капиллярному числу размер частицы в МД получается меньше, чем в эксперименте, если для моделирования применить межчастичный потенциал, дающий уменьшенный коэффициент поверхностного натяжения. Причем в 3D геометрии уменьшение размера входит в кубе. За счет этого обеспечивается значительный выигрыш в параметрах расчета.

Сайт проекта: <http://laser.itp.ac.ru/RNF-14-19-01599/index.html>

на английском языке

Together with a group of experimenters from (i) Australian centers of microphotonics and nanofabrication, (ii) a number of Far Eastern scientific organizations and (iii) FIAN, ITMO Spb. at theoretical and numerical investigations of researches from N.L. Dukhov VNIIA and L.D. Landau Institute for Theoretical Physics, the head institution of the proekt, a great deal of work aimed at the controlled creation of optimal surface structures of subwave dimensions with an artificially created required dielectric function is performed. Large-scale numerical simulation showed that superfast (pulse duration 230 fs) release of laser energy in metal films induces rapid melting and melt motion, resulting in a complex redistribution of the film material at the nanoscale after recrystallization. Melting-overflow-crystallization form the morphology of nanostructures. Morphological nanocharacteristics of structures (diameter, curvature of the dome, frozen jet at the apex, drop on the jet, etc.) strongly influence the optical response at plasmon probing. This makes it possible to apply the resulting arrays of structures in nonlinear optical application. The combined theoretical approach based on the separation of the relatively slow hydrodynamic motion of the film and fast physical processes that determine the separation of the film from the substrate was used in the simulation; all the physical processes associated with the absorption of laser energy, electron-ion energy exchange, acoustic relaxation and hydrodynamic motion were taken into account.

A comprehensive analysis of the influence of the film thickness on the ablation dynamics at laser action of various durations from tens of femtoseconds to the subnanosecond range is carried out. The solution to this problem is essential for laser transfer of matter (LIFT / LIBT - laser-induced forward / backward transfer, laser printing). Films are considered as thin, if their thickness is small compared to the depth of heating by a laser. The dynamics of thin metal films, homogeneously heated by a laser pulse, both free-hanging and experiencing undamped acoustic vibrations with low absorbed fluences, and films on a substrate, in which these oscillations are damped due to excitation of sound waves in the substrate, are studied in detail. The dynamics of detachment of a part of the film with increasing fluence is studied for both thin films and thick films with a thickness greater than the depth of heating.

A2. Work has been done to simulate the effect of an X-ray optical vortex on a multilayer target. The phenomenon of the formation of the central tip in the vicinity of the vortex center is understood, where the intensity of the action is close to zero. Prior to this, only the effect of light vortices of the infrared and optical ranges was studied. In a work performed jointly with experimenters from Japan, a hard X-ray (7.71 keV) laser femtosecond pulse was emitted from the XFEL-X-ray free electron laser SACLA (Japan). Both single-layer and multi-layered targets were considered. In the multi-layer case, large-scale numerical simulation was carried out for five alternating layers of gold and chromium deposited on a silicon

substrate. Interaction of the vortex pulse with the target leads to the formation of a toroidal shell from the melt of metals. The capillary tension in the inner ring of the toroid leads to the tightening of the inner ring to the axis, converting it into a tube and compressing the tube into a central columnar solidified structure. The formation of extremely sharp needles was studied when the laser beam was focused in a small spot on the film, limited by diffraction. Needles have a rounding radius at the top of several nanometers. Such needles can be used, for example, as concentrators of the electric field at its apex. It is found that unusual crystalline forms with 5-fold symmetry (icosahedron) appear in the vicinity of the taper.

A3. The actual for modern plasmonics problem of creation of periodic structures on a metal surface is studied. In one embodiment, the formation of periodic structures is considered due to the release of energy from the interference of laser radiation on the surface of the film and the surface plasmon-polariton mode in it in the Kretschmann geometry. In another embodiment, the periodic corrugation of the metal surface is created by the fact that the laser pulse acts on a solitary structure on a metal film (this structure is created by the action of a preliminary strongly focused pulse on the film). Corrugation arises from the interference of the surface plasmon wave from a solitary structure with a laser radiation field. A simulation was performed that determines the wavelength of the plasmon mode (about 400 nm) and the depth of modulation of the maximum / minimum of the standing wave (tens of percent). Hydrodynamic modeling using the thin-film method and large-scale molecular dynamics were performed. The development of corrugation at the stage of capillary retardation of the film and its recrystallization is modeled in detail. Previously, neither thin film method nor MD was used for periodic corrugation problems.

A4. Calculations of the effect of long (ns) pulses.

In the thin film approximation, a program is developed for solving problems with long (nanosecond) laser pulses. In the program, in addition to film inertia and surface tension, the thermal conductivity necessary for estimating the rate of cooling of the film is taken into account. The dependence of the saturated vapor pressure of a metal film on temperature is taken into account. In a series of calculations in this approximation it is shown that the film separates from the substrate due to the saturated vapor pressure. Initially, a vapor interlayer occurs in the region of contact between the film and the substrate. Then the vapor accelerates the film, and a dome is formed on it. The picture is similar to the case of ultrashort pulses, when the separation of the film and its flight by inertia are associated with a short stage of mechanical repulsion of the film from the substrate. With nanosecond action, the film gradually cools down due to the heat sink to the periphery, the falling vapor pressure, because of which the dome grows, becomes dynamically insignificant, and the capillary slowing comes to the fore.

[B]. The problem of the effects of the action of a subnanosecond (600 ps) optical laser pulse on a tantalum film and the diagnostics of the results of action with the help of ultrashort (several fs) hard (10-20 keV) free electron laser pulse was studied. It is shown that the combined action of a powerful optical laser pulse (pump pulse) and a femtosecond pulse of X-ray probing radiation (probe pulse) makes it possible to detect the dynamics of the destruction of the crystal lattice in a tantalum film at an ultrahigh deformation rate of $\sim 2 \times 10^8$ - 3.5×10^8 1/s. Using the method of X-ray diffraction in real time, opens the way to studying the structure of matter under stress and the dynamic destruction of materials at the atomic level. Using this method, the maximum reduction in density from 8 to 10% associated with the beginning of the break in the tantalum sample was directly measured and spallation strength ~ 16.8 GPa was determined. This experimental technique opens a new way for investigating phenomena at ultrahigh strain rates in materials on an atomic scale, including high-speed fracture dynamics and stress-induced structural transitions in solids.

An important cycle of investigations in the field generation and propagation of shock waves by laser irradiation has been performed. They are related to modeling the propagation of shock waves in strong ceramics such as boron carbide, etc. It is shown that the use of SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) programs in our multiprocessing realization allows us to describe the multi-stage process of destruction of ceramics with high accuracy and see the internal structure of the fracture waves.

Passage of a strong shock wave through a slurry of liquid and spherical metal particles is analyzed. It is

shown that the shock wave deforms the particles and entrains them in the direction of their motion. The solution of the practically important and theoretically complex problem of modeling the dispersion of tin droplets with the addition of iridium is begun. During the reporting period, SPH-programs were prepared to solve it. Numerical simulation has been started. We have developed a powerful multiprocessor version of the SPH code. This allowed us to bring the number of SPH particles to a billion in high-performance clusters, which allows us to describe complex three-dimensional processes in detail. Difficulty is related precisely to the geometric complexity of the problem. To circumvent these problems, an axisymmetric approximation is used. The calculation is carried out in stages. With small particles, the stage of the initial laser energy input and the achievement of a triangular shock wave propagating deeper into the spherical droplet at 4 μm is passed (stage 1). Then the final data of stage 1 are coarsened and used already as initial data of stage 2. In this axisymmetric approximation, the modeling of the ablation of the tin drop are performed.

A program for constructing X-ray images was created, which makes it possible to build images of an interferometric pattern on a CCD array and to obtain Newton's rings at laser ablation.

[C] The program of one-dimensional two-temperature hydrodynamic computations (1D-2T-HD) has been developed taking into account our latest data on the electronic contribution, and in connection with the created programs for constructing X-ray images. Electronic contribution to the heat capacity and pressure are found with the help of quantum mechanical calculations of the states of a two-temperature condensed medium arising from the action of an ultrashort laser pulse. For calculations, DFT (Density Functional Theory) codes VASP, Elk, and others are applied.

[D] Work has been done on the interaction of polarized light with small particles. A study was made of the absorption of radiation of different multipolarity by small particles, depending on their size, shape, and complex permittivity of the particle material.

[F] The most important question is the mechanisms of nanoparticle formation during laser ablation of a metal target into a liquid. The problem of ablation of gold in water is considered and a great work has been done to determine the intermolecular and interatomic potentials in this mixture (gold-gold, water-gold, water-water). With these potentials, gold-water ablation calculations were performed using large-scale molecular dynamics in combination with a description of thermal conductivity by the Monte Carlo method, and also using a hydrodynamic code with two-temperature physics, a wide-range equation of state of gold, and approximation of water adiabat. With the help of the calculations performed, it is shown how gold nanoparticles break away and enter the liquid, how they appear inside the vapor (vapor of the liquid) bubble.

[G] During the reporting period, it was possible to create potentials of interatomic interaction of tin with significantly different values of the coefficient of surface tension. They are required for scaling the requirements for the volume of molecular dynamics (MD) calculations in the direction of reducing these requirements. Equivalent in the sense of the similarity theory with respect to the capillary number, the particle size in the MD is obtained less than in the experiment if the interparticle potential giving a reduced coefficient of surface tension is used for modeling. And in 3D geometry, the size reduction cubically multiplies. Due to this, a significant gain in the calculation parameters is ensured.

Project website: <http://laser.itp.ac.ru/RNF-14-19-01599/index.html>

1.6. Файл с дополнительными материалами

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

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

1.7. Перечень публикаций за год по результатам проекта

(публикации добавляются из списка зарегистрированных участниками проекта публикаций)

1. Албертаззи Б., Озаки Н., Жаховский В., Фаенов А., ... Ильницкий Д., Иногамов Н. и др.

Проект № 14-19-01599/2017 Страница 27 из 73

(Albertazzi B., Ozaki N., Zhakhovsky V., Faenov A., ... Ilitsky D., Inogamov N., et al.) **Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress** SCIENCE ADVANCES (2017 г.)

2. Анисимов С. И., Жаховский В. В., Иногамов Н. А., Мурзов С. А., Хохлов, В. А. (Anisimov S.I., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Murzov S.A., Khokhlov V.A.) **О формировании и кристаллизации жидкой струи, возникающей при воздействии на пленку острософокусированным лазерным пучком** Квантовая Электроника (2017 г.)

3. Ванг К.В., Кучмижак А.А., Ли, К., Йуодказиз С., Витрик О.Б., Кулчин Ю.Н., Жаховский В.В., Данилов П.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Руденко А.А., Иногамов Н.А. (Wang, X. W.; Kuchmizhak, A. A.; Li, X.; Juodkasis, S.; Vitrik, O. B.; Kulchin, Y. N.; Zhakhovsky, V. V.; Danilov, P. A.; Ionin, A. A.; Kudryashov, S. I.; Rudenko, A. A. & Inogamov, N. A.) **Laser-induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: non-invasive characterization and predictive modeling via mapping at nanoscale** Physical Review Applied (2017 г.)

4. Дьячков С.А.Ю Медин С.А., Егорова М.С., Жаховский В.В., Паршиков А.Н. (Dyachkov, S. A.; Medin, S. A.; Egorova, M. S.; Zhakhovsky, V. V. & Parshikov, A. N.) **Boron carbide: SPH simulation of shock-wave experiments with the JHB-based failure model** Journal of Applied Physics (2018 г.)

5. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V. & Khokhlov, V. A.) **Warm Dense Matter in Extremely Small Volume - Hydrodynamics of Nanofilms Triggered by Laser Irradiation at Diffraction Limit** Conference Proceedings of the 20th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Bulletin of the American Physical Society (2018 г.)

6. Иногамов Н.А., Жаховский В.В. (Inogamov N. A., Zhakhovsky V. V.) **Simulations of Short Pulse Laser-Matter Interaction in Case of Tight Focusing onto Thin Film** Lobachevskii Journal of Mathematics (2017 г.)

7. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. (Inogamov, N.; Zhakhovsky, V. & Khokhlov, V.) **Laser Ablation of Metal into Liquid: near Critical Point Phenomena and Hydrodynamic Instability** Conference Proceedings of the 20th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Bulletin of the American Physical Society (2018 г.)

8. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. (Inogamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khokhlov, V. A.) **Laser ablation caused by geometrically constrained illumination and inventive target design** J. Phys.: Conf. Ser., (2017 г.)

9. Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Жаховский В.В., Хищенко К.В., Анисимов С.И. (Inogamov, N. A.; Khokhlov, V. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khishchenko, K. V. & Anisimov, S. I.) **Ablation of gold into water** Matter and Radiation at Extremes (2017 г.)

10. Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В., Мигдал К.П., Ильнитский Д.К., Хасегава Н., Нишикино М., Ямагиwa М., Ишино М., Кавачи Т., Фаенов А.Я., Пикуз Т., Баба М., Минами И., Суемото Т. (Inogamov, N. A.; Khokhlov, V. A.; Petrov, Y. V.; Zhakhovsky, V. V.; Migdal, K. P.; Ilitsky, 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.)

11. Кохумура И., Жаховский В., Такей Д., Сузуки И., Такеши А., Иноуэ И., Инубуши И., Иногамов Н., Ишикава Т., Ябаши М. (Kohmura, Y.; Zhakhovsky, V.; Takei, D.; Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Inoue, I.; Inubushi, Y.; Inogamov, N.; Ishikawa, T. & Yabashi, M.) **Nano-structuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration** Applied Physics Letters (2017 г.)

12. Кохумура И., Жаховский В., Такей Д., Сузуки И., Такеши А., Иноуэ И., Инубуши И., Иногамов Н., Ишикава Т., Ябаши М. (Kohmura, Y.; Zhakhovsky, V.; Takei, D.; Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Inoue, I.; Inubushi, Y.; Inogamov, N.; Ishikawa, T. & Yabashi, M.) **Supplementary material for the document entitled: Nano-structuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration** Applied Physics Letters (2017 г.)

13. М.С.Егорова, С.А.Мурзов, В.В.Жаховский, А.Н.Паршиков (M.S. Egorova, S.A. Murzov, V.V. Zhakhovsky, A.N. Parshikov) **Прохождение ударной волны через взвесь металлических частиц в жидкости** Физико-химическая кинетика в газовой динамике (2017 г.)

14. Мирошенко А. Е. и Трибельский М. И. (Miroshnichenko, A. E. & Tribelsky, M. I.) **Ultimate Absorption in Light Scattering by a Finite Obstacle** Physical Review Letters (2017 г.)

15. Мирошниченко А.Е., Трибельский М.И. (Miroshnichenko, A. E., Tribelsky, M. I.) **Ultimate Absorption in Light Scattering by a Finite Obstacle Supplemental Material** Physical Review Letters (2017 г.)

16. С.А.Дьячков, А.Н.Паршиков, В.В.Жаховский (S A Dyachkov, A N Parshikov, V V Zhakhovsky) **SPH simulation of boron carbide under shock compression with different failure models** Journal of Physics: Conference Series (2017 г.)

17. Свяковский С.Е., Терновский В.В., Трибельский М.И. (Svyakhovskiy, S. E.; Ternovskiy, V. V. & Tribelsky, M. I.) **Transient effects in resonant light scattering by particles: Anapole as a storage for “frozen light”?** Physical Review Letters (2017 г.)

18. Фаенов А., Пикуз Т, Ишино М., Иногамов Н., Жаховский В., Скобелев И., Хасегава Н., Нишикино М., Кандо М., Кодама Р., Кавачи, Т (Faenov, A.; Pikuz, T.; Ishino, M.; Inogamov, N.; Zhakhovsky, V.; Skobelev, I.; Hasegawa, N.; Nishikino, M.; Kando, M.; Kodama, R. & Kawachi, T.) **Soft x-ray laser ablation of metals and dielectrics** Proceedings of SPIE (2017 г.)

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

1.8. В 2017 году возникли исключительные права на результаты интеллектуальной деятельности, созданные при выполнении проекта:
нет

1.9. Показатели реализации проекта

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

Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

Показатели	Единица измерения	2017 год	
		план	факт
Число членов научного коллектива	человек	16	15
Число исследователей в возрасте до 39 лет среди членов научного коллектива	человек	9	8
в том числе:			
кандидатов наук в возрасте до 35 лет (включительно)	человек		1
аспирантов (интернов, ординаторов) и (или) студентов очной формы обучения	человек		3
Количество лиц категории «Вспомогательный персонал»	человек		0

Публикационные показатели реализации проекта (значения показателей формируются автоматически на основе данных, представленных в форме 2о (накопительным итогом). 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).

Плановые значения указываются только для показателей, предусмотренных соглашением.

Публикационные показатели реализации проекта (нарастающим итогом, за исключением показателя «Число цитирований...»)	Единица измерения	2017 год	
		план	факт
Количество публикаций по проекту членов научного коллектива в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (SCOPUS)	Ед.	5	15
Число цитирований публикаций членов научного коллектива в научных журналах, индексируемых в международной базе данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) в отчетном году	Ед.		35
Количество публикаций по проекту членов научного коллектива в изданиях, учитываемых в базе данных «РИНЦ»	Ед.	5	13
Количество монографий по проекту членов научного коллектива	Ед.		0
Количество зарегистрированных результатов интеллектуальной деятельности по проекту членов научного коллектива	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.)

III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии", 24-27 января 2017 (ЛаПлаз-2017), Москва, НИЯУ МИФИ, <http://laplas.mephi.ru/LaPlas2017/>

Устный доклад

Ильницкий Д.К., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Математическое моделирование образования адиабатических полос сдвига в металлах

VI Международная конференция "Фотоника и информационная оптика", Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 1-3 февраля 2017

Пленарный доклад

Трибельский М.И., ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА ЧАСТИЦАМИ С БОЛЬШИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Международная конференция XXXII International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, March 1-6, 2017, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. <http://www.ihed.ras.ru/elbrus17/>

1. Устный доклад

Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Khokhlov V.A.,

Irradiation of thin metal film standing without support by femtosecond laser in the case when illuminated spot is small.

Стендовые доклады:

2. Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Khokhlov V.A., Separation of film from substrate by radially polarized laser beam. Shepelev V.V., Inogamov N.A., Interaction between ultrashort laser radiation and metal surface: Influence of multidimensional geometry to the formation of surface nanostructures.

3. Petrov Yu.V., Mokshin A.V., Galimzyanov B.N., Inogamov N.A., Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid aluminum in the two-temperature state.

4. М.С. Егорова, С.А. Дьячков, А.Н. Паршиков, В.В. Жаховский, Д.Б. Рогозкин, С.Е. Куратов, Modeling of shock-induced ejecta from a layer of spherical particles.

5. Dyachkov S.A., Parshikov A.N., Zhakhovsky V.V., SPH simulated boron carbide failure under shock compression

6. S. A. Murzov, V. V. Zhakhovsky, Atomistic simulation of hotspots in AB model energetic material

7. Shepelev V.V. and Inogamov N.A., Interaction between ultrashort laser radiation and metal surface: Influence of multidimensional geometry to the formation of surface nanostructures

British-Russian Workshop on Quantum Technologies, Москва, Россия, 20-23 марта 2017, <https://istina.msu.ru/conferences/54989380/>

Приглашенный доклад

Tribelsky M.I., Peculiarities of Resonant Light Scattering by Particles with High Refractive Index

XI Научно-техническая конференция "ВНИИА-2017", (09-31.03.17 г. Москва)

Устный доклад

С. А. Мурзов, В.В. Жаховский, Атомистическое моделирование горячих точек в модельном энергетическом материале,

Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017

Устные доклады

1. Терновский В.В., Свяховский С.Е., Трибельский М.И., Моделирование переходных процессов при резонансах Ми высокой добротности (Устный)

2. Свяховский С.Е., Терновский В.В., Трибельский М.И., Нестационарные эффекты при резонансном рассеянии света цилиндром с большим коэффициентом преломления(Устный)

Всероссийская конференция Харитоновские научные чтения XIX, 17-21 апреля, РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Саров.

Устный доклад

1. С. А. Дьячков, В. А. Аринин, В. В. Жаховский, П. Ю. Коротаев, С. Е. Куратов, К. Н. Панов, А. Н. Паршиков, С. Ю. Согрин, П. А. Покаташкин, А. В. Янилкин Разрушение карбида бора при ударно-волновом нагружении: многомасштабное моделирование и эксперимент

Стендовые доклады

2. М.С. Егорова, С.А. Дьячков, А.Н. Паршиков, В.В. Жаховский, Д.Б. Рогозкин, С.Е. Куратов, Моделирование ударного нагружения слоя металлических частиц сферической формы методом SPH.

3. С. А. Мурзов, В. В. Жаховский, Атомистическое моделирование инициирования детонации модельного взрывчатого вещества АВ
4. Ильницкий Д.К., Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Математическое моделирование образования полос сдвига

Международная конференция «Дни Ландау – 2017» 26-29 июня, Черноголовка,
<http://landadays.itp.ac.ru/ld2017/>

Устный доклад

Petrov Yu. V., Inogamov N. A., Mokshin A. V., Galimzyanov B. N. Electrical and thermal conductivities of Al in liquid two-temperature state

20th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter, July 9-14, 2017, St. Louis, USA, <http://cm.wsu.edu/ehome/sccm/437097/>

Oral reports

1. S.A. Dyachkov, A. N. Parshikov, V. V. Zhakhovsky, Boron carbide: hydrocode simulation of plate-impact experiments with an improved failure model
2. V. V. Zhakhovsky, S.A. Dyachkov, N.A. Inogamov, Formation, instability and fragmentation of shock-produced jets
3. S. A. Murzov, V. V. Zhakhovsky Shock initiation in atomistic and mesoscopic simulation of porous condensed explosives

Школа-семинар "Суперкомпьютеры в научных исследованиях: горизонты атомистического моделирования и эффективного суперкомпьютерного ко-дизайна", 26-27 июля 2017 МИЭМ ВШЭ,
<https://samma.hse.ru/supercomp17> Устный доклад

М.С. Егорова, С.А. Дьячков, С.А. Мурзов, С.Ю. Григорьев, А.Н. Паршиков, В.В. Жаховский, Динамическая декомпозиция по Вороному для сбалансированного параллельного моделирования движения веществ в экстремальных состояниях методами частиц.

6th International Conference 10th Anniversary program "Turbulent Mixing and Beyond", 14-18 August 2017, International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Italy, <http://users.ictp.it/~tmb/index2017.html>

Invited lectures

1. Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Khokhlov V.A. Hydrodynamic instability as consequence of laser action
2. Zhakhovsky V.V., Dyachkov S.A., Inogamov N.A. Instability and fragmentation of liquid jets: molecular dynamics and smoothed particle hydrodynamics simulations

Oral reports

3. Inogamov N.A., Zhakhovsky V.V., Khokhlov V.A. Hydrodynamics of nanofilms with melting and re-crystallization non-equilibrium phase transitions of the first order under action of laser pulse
4. M.S. Egorova, Massively parallel SPH mesomodeling of shock-loaded spherical particles
5. S. A. Dyachkov, M. S. Egorova, A. N. Kondratev, D. B. Rogozkin, S. E. Kuratov, A. N. Parshikov, V. V. Zhakhovsky, A. V. Andriyash, Ejecta produced by Richtmyer-Meshkov instability from free metal surfaces
6. S. A. Murzov, V. V. Zhakhovsky, MD simulation of hotspots and mesoscopic SPH model of porous condensed explosives
7. Initsky D., Inogamov N., Zhakhovsky V. Mathematical modeling of adiabatic shear bands formation under dynamical loading
8. Utkin PS, Fortova SV, Shepelev VV, Multifluid mathematical model for the numerical investigation of high-speed interaction of metal plates
9. Fortova SV, Shepelev VV, Instability of the interface between two high-speed colliding metal plates: 3D numerical simulation
10. Fortova SV, Shepelev VV, Kozlov SA, Troshkin OV, Application of program package

TurbulenceProblemSolver (TPS) to the modeling of the development of hydrodynamic instabilities

The 1-st Summer School «Physics and technologies in life sciences», Moscow, Россия, 24 июля - 4 августа 2017

Пленарные доклады

1. Tribelsky M.I., Light scattering by nanoparticles and their laser heating in medicine and biology I
2. Tribelsky M.I., Light scattering by nanoparticles and their laser heating in medicine and biology II

II Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" с элементами школы молодых ученых, Ялта, Республика Крым, 11-17 сентября 2017 г.

<http://www.itp.nsc.ru/tph/2017/>

Устные доклады:

1. Фортова Светлана Владимировна, Уткин П.С., Пронина А.П., Наркунас Т.С., Шепелев В.В. «NUMERICAL SIMULATION OF THE IMPACT OF HIGH-SPEED METALLIC PLATES USING TWO APPROACHES»
2. Шепелев В.В., Фортова Светлана Владимировна, Иногамов Н.А. «ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИШЕНЕЙ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ»
3. Фортова С.В., Шепелев В. В., Трошкин О.В., Опарина Елена Ивановна, Козлов С.А. «ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ-ТЕЙЛОРА И РИХТМАЙЕРА-МЕШКОВА»

Международная конференция International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2017, October 03-05, 2017, Moscow <http://ultrafastlight-2017.lebedev.ru/>

Пленарный доклад

N.A. Inogamov «Laser ablation: review of some results»

Приглашенный доклад

Faenov A.Ya., Pikuz T.A., Alkhimova M.A., Nishiuchi M., Skobelev I.Yu., Sakaki H., Pirozhkov A.S., Sagisaka A., Dover N.P., Kondo Ko., Ogura K., Fukuda Y., Pikuz S.A., Kiriya H., Kando M., Sentoku Y., Hata M., Zigler A., Frank Y., Nishitani K., Miyahara T., Watanabe Y., Kodama R., Kondo K.. Ionization and Ultraintense X-Ray Radiation of High Z Foils by Relativistic Femtosecond Laser Pulses Interaction.

International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, October 9-12, 2017, Moscow, Russia, <http://csp2017.ac.ru/>

Пленарный доклад:

Plenary Talk 5 N. Inogamov, Simulation of the diffraction limited gaussian and vortex illuminations of supported metallic films

7 th Annual World Congress of Nano Science & Technology-2017, Fukuoka, Япония, 24-26 октября 2017

Приглашенный доклад

Tribelsky M.I., Resonant Light Scattering by High Index Dielectric Nanoparticles as Grounds for New Applications

60-я научная конференция МФТИ, г. Долгопрудный, Россия, ноябрь 2017 г. <http://conf60.mipt.ru/>
С. А. Мурзов, В.В. Жаховский, Мезоскопическое моделирование детонации методом сглаженных частиц с использованием результатов молекулярно-динамического моделирования

11-я Всероссийская школа-семинар "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем" АФМ-2017 в Москве с 21 по 24 ноября 2017 года.

Устный доклад

М.С. Егорова, С.А. Мурзов, А.Н. Паршиков, В.В. Жаховский, Моделирование прохождения ударной волны через взвесь металлических частиц в неплотной среде

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, с упоминанием Фонда:

нет

Настоящим подтверждаю:

- самостоятельность и авторство текста отчета о выполнении проекта;
- что при обнародовании результатов выполненного в рамках поддержанного РНФ проекта научный коллектив ссылался 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 2017 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 Core Collection), «Скопус» (Scopus) и/или РИНЦ, каждая статья упоминается только один раз (независимо от языков опубликования).

1

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Албертаззи Б., Озаки Н., Жаховский В., Фаенов А., ... Ильницкий Д., Иногамов Н. и др.

на английском языке: Albertazzi B., Ozaki N., Zhakhovsky V., Faenov A., ... Ilnitsky D., Inogamov N., et.al.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

AUGMENTED-WAVE METHOD; EQUATION-OF-STATE; SHOCK-WAVES; SPALLATION; COMPRESSIBILITY; PRESSURES; TARGETS; METALS

2.5. Вид публикации

статья

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

SCIENCE ADVANCES

ISSN (при наличии): 2375-2548

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

V. 3, e1602705

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой электронной версии публикации (URL) в открытом источнике

(при наличии):

<http://advances.sciencemag.org/content/3/6/e1602705.full>

2.8. DOI (при наличии)

1126/sciadv.1602705

Accession Number WoS (при наличии): 000406370700022

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 заполняется.

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

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

да

V.Z., N.I., D.I., and K.P.M. were supported by Russian Science Foundation grant 14-19-01599 - В.Жаховский, Н.Иногамов, Д.Ильницкий и К.П.Мигдал поддержаны Российским Научным Фондом грант 14-19-01599

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Анисимов С. И., Жаховский В. В., Иногамов Н. А., Мурзов С. А., Хохлов, В.

А.

на английском языке: Anisimov S.I., Zhakhovsky V.V., Inogamov N.A., Murzov S.A., Khokhlov V.A.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

О формировании и кристаллизации жидкой струи, возникающей при воздействии на пленку острорасфокусированным лазерным пучком

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

УЛЬТРАКОРОТКОЕ ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, АБЛЯЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК, ОДИНОЧНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ

2.5. Вид публикации

статья

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

Квантовая Электроника

ISSN (при наличии): 1063-7818

e-ISSN (при наличии): 1468-4799

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

т. 47, № 6, с. 509-521

Месяц и год публикации: ---

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

http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=qe&paperid=16630&option_lang=rus

2.8. DOI (при наличии)

<https://doi.org/10.1070/QEL16381>

Accession Number WoS (при наличии): 000404958300003

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-85021829753

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 заполняется.

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

1.119

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

3

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Ванг К.В., Кучмижак А.А., Ли, К., Йуодказиз С., Витрик О.Б., Кулчин Ю.Н., Жаховский В.В., Данилов П.А., Ионин А.А., Кудряшов С.И., Руденко А.А., Иногамов Н.А.

на английском языке: Wang, X. W.; Kuchmizhak, A. A.; Li, X.; Juodkazis, S.; Vitrik, O. B.; Kulchin, Y. N.; Zhakhovsky, V. V.; Danilov, P. A.; Ionin, A. A.; Kudryashov, S. I.; Rudenko, A. A. & Inogamov, N. A.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Laser-induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: non-invasive characterization and predictive modeling via mapping at nanoscale

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

Subwavelength structures, ultrafast laser nanoprinting

2.5. Вид публикации

статья

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

Physical Review Applied

ISSN (при наличии): 2331-7019

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

V. 8, 044016

Месяц и год публикации: 10.2017

Адрес полнотекстовой электронной версии публикации (URL) в открытом источнике

(при наличии):

<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.8.044016>,

<https://arxiv.org/pdf/1703.06758v1>

2.8. DOI (при наличии)

10.1103/PhysRevApplied.8.044016

Accession Number WoS (при наличии): 000413732900004

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 заполняется.

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

4.808

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

V.V.Z. and N.A.I. are responsible for theoretical part of the paper, simulations, and comparison with experimental data; they acknowledge grant of the Russian Science Foundation (project no. 14-19-01599) - В.В.Жаховский и Н.А.Иногамов отвечают за теоретическую часть статьи, моделирование и сравнение с экспериментальными данными; они благодарят Российский Научный Фонд (проект № 14-19-01599)

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Дьячков С.А.Ю Медин С.А., Егорова М.С., Жаховский В.В., Паршиков А.Н.

на английском языке: Dyachkov, S. A.; Medin, S. A.; Egorova, M. S.; Zhakhovsky, V. V. & Parshikov, A. N.

WoS Researcher ID (при наличии): G-9560-2011

Scopus AuthorID (при наличии): 56847780800

2.2. Название публикации

Boron carbide: SPH simulation of shock-wave experiments with the JHB-based failure model

2.3. Год публикации

2018

2.4. Ключевые слова

shock compression, SPH method for hydrodynamic, quantum molecular dynamics, boron carbide

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): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

2.068

2.12. Издание индексируется базой данных Scopus

да

2.13. Издание индексируется базой данных РИНЦ

Проект № 14-19-01599/2017 Страница 40 из 73

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

5

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Жаховкий В.В., Хохлов В.А.

на английском языке: Inagamov, N. A.; Zhakhovsky, V. V. & Khokhlov, V. A.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Warm Dense Matter in Extremely Small Volume - Hydrodynamics of Nanofilms Triggered by Laser Irradiation at Diffraction Limit

2.3. Год публикации

2018

2.4. Ключевые слова

ultrafast phase transfer, femtosecond laser pulse, two-temperature hydrodynamics, 3D molecular dynamics

2.5. Вид публикации

статья

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

Conference Proceedings of the 20th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Bulletin of the American Physical Society

ISSN (при наличии): ---

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

да

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

да

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

файл pdf, скачать

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

Simulations of Short Pulse Laser-Matter Interaction in Case of Tight Focusing onto Thin Film

2.3. Год публикации

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 указываются название издательства, город)

Lobachevskii Journal of Mathematics

ISSN (при наличии): 1995-0802

e-ISSN (при наличии): 1818-9962

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

V. 38, No. 5, pp. 914-920

Месяц и год публикации: 09.2017

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

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1995080217050158>

2.8. DOI (при наличии)

10.1134/S1995080217050158

Accession Number WoS (при наличии): 000411109900020

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-85029741364

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 заполняется.

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

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

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

7

2.1. Авторы публикации

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

на английском языке: Inogamov, N.; Zhakhovsky, V. & Khokhlov, V.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 36091200200

2.2. Название публикации

Laser Ablation of Metal into Liquid: near Critical Point Phenomena and Hydrodynamic Instability

2.3. Год публикации

2018

2.4. Ключевые слова

nanoparticles production, Rayleigh-Taylor instability, two-temperature hydrodynamic, MD simulations

2.5. Вид публикации

статья

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

Conference Proceedings of the 20th Biennial Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter. Bulletin of the American Physical Society

ISSN (при наличии): ---

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

да

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

да

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

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

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

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

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Laser ablation caused by geometrically constrained illumination and inventive target design

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

laser ablation, thin film, tightly focused femtosecond laser pulse

2.5. Вид публикации

статья

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

J. Phys.: Conf. Ser.,

ISSN (при наличии): 1742-6588

e-ISSN (при наличии): 1742-6596

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

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., Хохлов В.А., Жаховский В.В., Хищенко К.В., Анисимов С.И.

на английском языке: Inogamov, N. A.; Khokhlov, V. A.; Zhakhovsky, V. V.; Khishchenko, K. V. &

Anisimov, S. I.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Ablation of gold into water

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

laser ablation in liquid, molecular dynamics, Rayleigh-Taylor instability

2.5. Вид публикации

статья

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

Matter and Radiation at Extremes

ISSN (при наличии): ---

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

да

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

файл pdf, скачать

10

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Иногамов Н.А., Хохлов В.А., Петров Ю.В., Жаховский В.В., Мигдал К.П., Ильнитский Д.К., Хасегава Н., Нишилино М., Ямагива М., Ишино М., Кавачи Т., Фаенов А.Я., Пикуз Т., Баба М., Минами И., Сиёмото 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): 7004135519

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

thin metal film, fast laser heating, ablation, nanojets

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): ---

ISBN (при наличии): 978-0-7354-1457-0

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

V. 1793, 070012

Месяц и год публикации: ---

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

<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4971600>

2.8. DOI (при наличии)

10.1063/1.4971600

Accession Number WoS (при наличии): 000404282600144

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-85016953873

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 заполняется.

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

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

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: Кохумура И., Жаховский В., Такей Д., Сузуки И., Такеши А., Иноуэ И.,

Инубуши И., Иногамов Н., Ишикава Т., Ябаши М.

на английском языке: Kohmura, Y.; Zhakhovsky, V.; Takei, D.; Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Inoue, I.; Inubushi, Y.; Inogamov, N.; Ishikawa, T. & Yabashi, M.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Nano-structuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

laser ablation, X-ray Free Electron Laser, surface nano-structures

2.5. Вид публикации

статья

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

Applied Physics Letters

ISSN (при наличии): 0003-6951

e-ISSN (при наличии): 1077-3118

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

3.411

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

V.Z. and N.I. were supported by the Russian Science Foundation grant 14-19-01599 - В.Жаховский и Н.Иногамов были поддержаны Российским научным фондом, грант 14-19-01599

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

12

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Кохумура И., Жаховский В., Такей Д., Сузуки И., Такеши А., Иноуэ И., Инубуши И., Иногамов Н., Ишикава Т., Ябаши М.

на английском языке: Kohmura, Y.; Zhakhovsky, V.; Takei, D.; Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Inoue, I.; Inubushi, Y.; Inogamov, N.; Ishikawa, T. & Yabashi, M.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Supplementary material for the document entitled: Nano-structuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

laser ablation, X-ray Free Electron Laser, surface nano-structures

2.5. Вид публикации

статья

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

Applied Physics Letters

ISSN (при наличии): 0003-6951

e-ISSN (при наличии): 1077-3118

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection)

или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

3.411

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

нет

Статья является приложением к Kohmura, Y.; Zhakhovsky, V.; Takei, D.; Suzuki, Y.; Takeuchi, A.; Inoue, I.; Inubushi, Y.; Inogamov, N.; Ishikawa, T. & Yabashi, M. Supplementary material for the document entitled: Nano-structuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration Appl. Phys. Lett., 2017 Благодарности написаны в основной статье

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: М.С.Егорова, С.А.Мурзов, В.В.Жаховский, А.Н.Паршиков

на английском языке: M.S. Egorova, S.A. Mursov, V.V. Zhakhovsky, A.N. Parshikov

WoS Researcher ID (при наличии): G-9560-2011

Scopus AuthorID (при наличии): 56847780800

2.2. Название публикации

Прохождение ударной волны через взвесь металлических частиц в жидкости

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

ударные волны, жидкие металлические частицы, взвесь, скоростная неравновесность

2.5. Вид публикации

статья

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

Физико-химическая кинетика в газовой динамике

ISSN (при наличии): 1991-6396

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

да

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

2.10. Издание индексируется базой данных Web of Science Core Collection

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

файл pdf, скачать

14

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Мирошенко А. Е. и Трибельский М. И.

на английском языке: Miroshnichenko, A. E. & Tribelsky, M. I.

WoS Researcher ID (при наличии): H-4216-2011

Scopus AuthorID (при наличии): 6603359029

2.2. Название публикации

Ultimate Absorption in Light Scattering by a Finite Obstacle

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

light scattering, laser heating, laser damage

2.5. Вид публикации

статья

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

Physical Review Letters

ISSN (при наличии): 0031-9007

e-ISSN (при наличии): 1079-7114

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

8.462

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

acknowledges the financial support ... and Russian Science Foundation (Grant 14-19-01599) in the part of the computer simulation - благодарит за финансовую поддержку Российский Научный Фонд (грант 14-19-01599) в части компьютерного моделирования.

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Мирошниченко А.Е., Трибельский М.И.

на английском языке: Miroshnichenko, A. E., Tribelsky, M. I.

WoS Researcher ID (при наличии): H-4216-2011

Scopus AuthorID (при наличии): 6603359029

2.2. Название публикации

Ultimate Absorption in Light Scattering by a Finite Obstacle Supplemental Material

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

light scattering, laser heating, laser damage

2.5. Вид публикации

статья

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

Physical Review Letters

ISSN (при наличии): 0031-9007

e-ISSN (при наличии): 1079-7114

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

8.462

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

нет

Работа является приложением к работе Miroshnichenko, A. E. & Tribelsky, M. I., Ultimate Absorption in Light Scattering by a Finite Obstacle, Phys. Rev. Lett., 2017. Благодарности указаны в основной работе

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

16

2.1. Авторы публикации

на русском языке: С.А.Дьячков, А.Н.Паршиков, В.В.Жаховский

на английском языке: S A Dyachkov, A N Parshikov, V V Zhakhovsky

WoS Researcher ID (при наличии): G-9560-2011

Scopus AuthorID (при наличии): ---

2.2. Название публикации

SPH simulation of boron carbide under shock compression with different failure models

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

SPH simulation, shock compression, boron carbide

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): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

v. 815, 012012

Месяц и год публикации: ---

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

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/815/1/012012>

2.8. DOI (при наличии)

10.1088/1742-6596/815/1/012012

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 заполняется.

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

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

да

2.14. Публикация аффилирована с организацией

нет

Авторы указали только по одному основному месту работы

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: Свяковский С.Е., Терновский В.В., Трибельский М.И.

на английском языке: Svyakhovskiy, S. E.; Ternovski, V. V. & Tribelsky, M. I.

WoS Researcher ID (при наличии): H-4216-2011

Scopus AuthorID (при наличии): 6603359029

2.2. Название публикации

Transient effects in resonant light scattering by particles: Anapole as a storage for “frozen light”?

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

light scattering, anapole mode

2.5. Вид публикации

статья

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

Physical Review Letters

ISSN (при наличии): 0031-9007

e-ISSN (при наличии): 1079-7114

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: да

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

Месяц и год публикации: ---

Адрес полнотекстовой 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 заполняется.

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

8.462

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

... and Russian Science Foundation (Grant 14-19-01599) in the part of the computer simulation - ... и Российский Научный Фонд в части компьютерного моделирования

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

18

2.1. Авторы публикации

на русском языке: Фаенов А., Пикуз Т, Ишино М., Иногамов Н., Жаховский В., Скобелев И., Хасегава Н., Нишикино М., Кандо М., Кодама Р., Кавачи, Т

на английском языке: Faenov, A.; Pikuz, T.; Ishino, M.; Inogamov, N.; Zhakhovsky, V.; Skobelev, I.; Hasegawa, N.; Nishikino, M.; Kando, M.; Kodama, R. & Kawachi, T.

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

Scopus AuthorID (при наличии): 7004135519

2.2. Название публикации

Soft x-ray laser ablation of metals and dielectrics

2.3. Год публикации

2017

2.4. Ключевые слова

soft x-ray laser, surface modification, ablation threshold, modification threshold, surface machining, laser produced plasma, electron temperature

2.5. Вид публикации

статья

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

Proceedings of SPIE

ISSN (при наличии): 0277-786X

e-ISSN (при наличии): ---

ISBN (при наличии): ---

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

V. 10243, 102430S

Месяц и год публикации: 05.2017

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

2.8. DOI (при наличии)

10.1117/12.2264966

Accession Number WoS (при наличии): 000406855700018

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-85026458739

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 заполняется.

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

.37

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

V. Z., N. I., T. P., and A. F. acknowledge support from Russian Science Foundation (14-19-01599) - В. Жаховский, Н. Иногамов, Т. Пикуз и А. Фаенов благодарят за поддержку Российский Научный Фонд (14-19-01599)

2.16. Файл с текстом публикации

файл pdf, скачать

2.1. Авторы публикации

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

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

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

short pulse laser interaction, ablation, spallation

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): ---

ISBN (при наличии): 978-0-7354-1457-0

Издание индексируется базой данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus) и входит в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по Scopus SJR: нет

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

V. 1793, 100038

Месяц и год публикации: ---

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

<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4971663>

2.8. DOI (при наличии)

10.1063/1.4971663

Accession Number WoS (при наличии): 000404282600207

Scopus EID (при наличии): 2-s2.0-85017023854

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 заполняется.

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

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

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/

План работы на 2018 год и ожидаемые результаты по проекту
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»

3.1. План работы на 2018 год

(в том числе указываются запланированные командировки по проекту), до 5 стр.

На 2018 год запланирован обширный план работ. В основном он состоит из задач, перечисленных в заявке на продление гранта РФФИ на 2017 и 2018 гг. Плюс имеются важные дополнения. Эти дополнения связаны с успешным развитием исследований на этапе 2017 г. и новыми научными связями, которые сформировались за последние год-два (MESA+ University of Twente и Lasercenter Munich, University of Applied Sciences)

((1)) 3D эффекты, плавление/испарение/рекристаллизация, произвольная длительность лазерного импульса

Слова о трёхмерном пространстве означают, что мы будем учитывать конечный размер пятна нагрева. Сказанное о геометрии поясняет рис. 1 в приложенном п. 3.3. файле. Лазерный пучок $F(r)$ действует на мишень. Пусть пучок имеет максимум интенсивности на оптической оси (например, гауссов пучок). Глубина H (по нормали к границе мишени), на которую распространилось влияние лазерного воздействия, сравнивается с радиусом R пучка. Если глубина H мала по сравнению с радиусом R , то задачу можно кардинально упростить, перейдя от 3D к 1D пространству. Но если $H \sim R$ или $H > R$, то приходится решать полную, трудную 3D задачу. Кроме того, в окрестности порога задача всегда является трехмерной. Эта окрестность выделена кружком на рис. 1 в приложенном п. 3.3. файле. Например, рассмотрим ультракороткое воздействие с амплитудой, превышающей порог абляции; (длительность ультракороткого импульса τ_L мала по сравнению с акустическим масштабом времени d/c , где d – это глубина слоя прогрева: Heat Affected Zone, HAZ, c – скорость звука). Тогда на некоторой глубине под поверхностью мишени начинается нуклеация. В результате формируется полость tm_2 , наполненная двухфазной смесью, см. рис. 1. В боковом направлении полость оканчивается на радиусе r^* . Окончание r^* находится там, где флюенс $F(r^*)$ снижается до порогового значения F_{thr} .

Примеры 3D формирований приведены на рис. 2 в приложенном п. 3.3. файле. Подчеркнем, это две принципиально разные ситуации, хотя на вид морфология аналогична. В обоих случаях использовалась металлическая пленка, напыленная на диэлектрическую подложку. Слева пленка тонкая – в том смысле, что толщина слоя прогрева HAZ в материале пленки больше, чем толщина пленки. Тогда пленка прогревается однородно по нормали вдоль своей толщины. Причем в случае на рис. 2 слева импульс ультракороткий – нагрев завершается до того, как звук пробежит пленку по ее толщине. Если в левом случае неважно, с какой стороны происходит нагрев пленки (со стороны материальной прозрачной подложки, т.е. нагрев снизу на рис. 1, или со стороны вакуума, т.е. нагрев сверху на рис. 1), то в правом случае это существенное обстоятельство. В левом случае имеет место однородный нагрев пленки по ее толщине, поэтому направление нагрева не играет роли. Тонкая пленка (левый случай) отлетает от подложки под действием давления, действующего на контакте между пленкой и подложкой.

Одно из основных направлений работ по гранту РФФИ 14-19-01599 связано с 3D уединенными формированиями на тонких пленках, остающимися после ультракороткого удара (это левый случай на рис. 2 в приложенном п. 3.3. файле). В результате наших исследований по гранту этот вопрос решен, см. статьи и отчеты за 2015 и 2016-й годы. Отметим, что до нашего цикла работ решения этой важной проблемы не было. Хотя первые экспериментальные фото вида,

показанного слева на рис. 2, появились в 2003, 2004 гг.; работы Korte F., Koch J., and Chichkov B.N. Appl. Phys. A, 79, 879 (2004); Y. Nakata, T. Okada, M. Maeda, Jpn. J. Appl. Phys. 42 (2003) L1452. В предыдущих теоретических и численных работах не удавалось получить картину с джетом на вершине купола.

На этапе 2018 г. исполнения гранта, наработанные на предыдущих этапах подходы, будут применены к более сложному случаю, к толстым пленкам. Будут рассмотрены как ультракороткий импульс, так и длинные импульсы. Сначала мы рассмотрим проблему с формированием, показанным на рис. 2 в приложенном п. 3.3. файле справа. Затем перейдем к еще более сложной проблеме с толстой пленкой на подложке, освещаемой со стороны вакуума.

Наши подходы состоят в применении комбинированной методики. Сначала решаются одномерные задачи с полной двухтемпературной физикой, гидродинамикой и уравнениями состояния. Учитываются процессы плавления, испарения и затвердевания по мере остывания. Находится распределение скорости по веществу в конце стадии падения давления на контакте подложка – пленка до малых значений. По распределениям скорости и температуры мы определяем слой, который в будущем сформирует жидкую оболочку. Далее используем полуаналитическую модель бесконечно тонкой оболочки для подготовки начальных данных для молекулярно-динамического моделирования.

К этому кругу относится и проблема с воздействием наносекундных импульсов. На этапе 2017 года были подготовлены подходы к этой проблеме с помощью модели бесконечно тонкой оболочки. В 2018 г. решение будет окончено. Будут добавлены данные молекулярно-динамического моделирования и написана статья. Отметим важность данного направления. Многие лаборатории предпочитают для фабрикации наноструктур применять именно наносекундные лазерные системы, как более простые.

((2)) Фазовые пластинки и вихревые пучки электромагнитного излучения

С помощью фокусировки и фазовых пластинок создают «закрученные» потоки ЭМ излучения. Вихревой оптический пучок создает на мишени спиральное острие, см. рис. 3 в приложенном п. 3.3. файле. Это популярное сегодня направление исследований, по которому публикуются десятки работ в год, см. например, K. Toyoda, Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures, Nano Lett. (2012) v. 12, 3645-3649. Предполагается, что в будущем такие хиральные наноструктуры позволят различать хиральность и оптическую активность молекул на наномасштабах. Можно будет влиять на химические реакции на хиральных плазмонных наноструктурах. С этими возможными приложениями связан интерес к проблеме. Статей по проблеме много. Но все они посвящены или вопросам формирования вихревого пучка в теории и на практике, или эксперименту. Авторы подсчитывают орбитальный момент и связывают его знак с направлением закрутки - Takahashi et al., Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle, Scientific Reports | 6:21738 | DOI: 10.1038/srep21738. Нет ни одной работы, в которой на базе физики взаимодействия излучения с веществом авторы хотя бы пытались проанализировать ситуацию. Наша работа по направлению ((2)) в 2018 г. будет нацелена на исправление этого положения. Будет проанализировано влияние оптических вихрей на основе пучков Лагерра-Гаусса и Эрмита-Гаусса на гидродинамику расплава вещества мишени в пятне лазерного нагрева.

((3)) Термомеханические эффекты при интерференции ЭМ волны и плазмонного поля, запись голограмм

По этому направлению многое сделано в 2017 году. За 2018 г. будет изучено влияние параметров, соответственно накоплены варианты расчетов и даны конкретные рекомендации экспериментаторам. Далее будут выполнены проверки, собраны белые материалы и подготовлены публикации.

((4)) Мягкий рентген, косое падение, кольца Ньютона и построение интерферометрических изображений – расшифровка эксперимента.

Очень важным является продолжение кооперации с японской исследовательской группой «X-ray Laser Group» проф. Кавачи и др. Ишино в Kansai Photon Science Institute, QST. Это активная группа, имеющая в своем распоряжении мягкий (13.9 нм) рентгеновский лазер (SXRL) в KPSI и имеющая доступ к мощному суперсовременному лазеру на свободных электронах XFEL SACLA. Они ставят перед нами, во-первых, вопрос об абляции (т.е. о повреждении, модификации мишеней) на SXRL и на XFEL. Во-вторых, за 2018 г. будет доведен до публикации вопрос об интерпретации и построении изображений колец Ньютона и интерферометрических полос при памп-проб освещении облученной мишени проб импульсами мягкого рентгена косого падения. Отметим, что вопрос об абляции материалов под действием облучения с длиной волны 13.9 нм тесно связан с обработкой при литографии на длине волны «оловянной лампочки» 13.5 нм.

((5)) Лазерная фрагментация капель

Будут проанализированы задачи о лазерном диспергировании капель. Эта задача связана с литографическими машинами на жестком ультрафиолете – мягком рентгене. В 2017 г. была проведена большая работа по моделированию распыления капель, см. отчет-2017. Для расчетов подготовлен многопроцессорный вариант SPH (smooth particle hydrodynamics) кода. Многопроцессорность позволяет намного увеличить число SPH-частиц, и т.о. сильно повысить точность моделирования. Первые SPH расчеты были выполнены в 2017 г. Теперь мы перейдем от прикидочных расчетов к беловым. Вместе с трехмерным осесимметричным SPH расчетом ведется 1D двухтемпературный (2Т) расчет с помощью гидродинамического кода по лагранжевой координате. Во-первых, это дает нам информацию о формировании и эволюции «треугольной» ударной волны, которая распространяется к центру сферической капли. Этот профиль при необходимости будет перенесен в SPH расчет. Во-вторых, нас интересует ситуация при подходе сходящейся ударной волны к центру и при отражении от центра. Кроме того, мы разрабатываем параметры скейлинга, чтобы на малой молекулярно-динамической системе (шарик расплава олова с радиусом 50 нм) промоделировать лазерный удар по капле с радиусом 50 мкм.

((6)) Рентгеновская и оптическая абляция рутения

В настоящее время быстро растут мощности и частота повторения рентгеновских лазеров на свободных электронах XFEL. В связи с этим разрабатываются покрытия, которые выдерживают воздействия ультракоротких интенсивных рентгеновских импульсов. Физическое описание механизмов повреждения поверхности необходимо для оценки времени жизни покрытий под действием жесткого излучения. Рутений считается подходящим материалом для таких покрытий. Наши коллеги экспериментаторы (Др. И. Махоткин и др.) из университета Твенте, Энсхеде, Голландия (группа Проф. Др. Fred Bijkerk) накопили много данных по рентгеновскому воздействию на рутений. Чтобы иметь возможность проводить сопоставление, ими были проведены серии опытов с воздействием на рутений оптическим лазером.

В 2018 г. нами будет создана физическая модель рутения и будет проведено численное моделирование воздействия рентгеновского и оптического излучений. Будет разработан межатомный потенциал рутения (Ru имеет ГПУ решетку) и выполнено молекулярно-динамическое моделирование. Результаты будут сопоставлены с опытами.

((7)) Формирование наночастиц при абляции золота в воду

Это важная тематика, по которой имеется обширный и до сих пор плохо понятый эксперимент. На этапе 2017 г. были выполнены первые расчеты (одна статья послана в печать, другая принята к публикации). Этап 2018 г. является завершающим по данной проблеме. Будут выполнены крупномасштабные молекулярно-динамические и гидродинамические расчеты. Важно, что будут изучены случаи с более высокими значениями поглощенной энергии чем те, которые были

рассмотрены в 2017 г.

((8)) Проверка двухтемпературной теплофизической модели тантала

Важнейшими параметрами двухтемпературной модели являются теплоемкость, теплопроводность и коэффициент обмена энергией между электронной и ионной подсистемами. Имеются расчетные подходы к определению этих параметров. Спрашивается, как проверить расчет в эксперименте? В 90-е годы с помощью измерений терморелефлексанса определяли коэффициент обмена. Но эти измерения относились к слабым нагревам, ниже порога плавления. На сегодня ситуация при высоких нагревах остается неясной.

В 2018 г. с помощью DFT (Density Functional Theory) вычислений будет уточнена двухтемпературная модель тантала. Будут вычислены указанные параметры модели. Понятно, что значения параметров определяют форму волны сжатия, которая возникает под действием лазерного импульса. Эта волна распространяется из нагретого поверхностного слоя. Считаем лазерный импульс (поглощенный флюенс, длительность и вообще временная форма) фиксированным. Сравним форму волны сжатия при большом и малом значении параметра электрон-ионного обмена. При большом значении релаксация идет быстро, слой прогрева получается тонким, а давление в нем велико. При малом значении импульса слой прогрева толще, а давление в нем ниже.

Время пробега пленки волной сжатия (и закон смещения тыльной границы пленки) будет разным при разных значениях коэффициента обмена. Это открывает путь к проверке параметров.

В данном разделе плана будем проверять влияние полувалентной 4f зоны тантала при нагревах выше 30 кК на параметры и, соответственно на форму волны сжатия. Сначала выполним такие проверки в расчетах. А затем предложим данную работу экспериментаторам.

В двухтемпературном гидродинамическом расчёте будут вычислены смещение задней границы пленки и глубина откольного кратера на фронтальной поверхности. Будет выяснено, как включение/исключение 4f-вклада в электронные теплоемкость, внутреннюю энергию, электрон-фононный теплообмен сказывается на смещении границы и глубине кратера.

((9)) Ультратонкие пленки молибдена

Наши коллеги из Lasercenter Munich, University of Applied Sciences собрали много уникальных данных по лазерному воздействию на пленки молибдена толщиной 10 нм. В 2018 г. нами будет создана физическая модель молибдена и проведено численное моделирование. Это позволит существенно уточнить высокотемпературные теплофизические и оптические данные по этому важному тугоплавкому металлу.

Литература

[1] Данилов и др. Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки, Письма ЖЭТФ (2016) т. 104(11), с. 780

[2] Qingfeng Li et al., Laser-induced nano-jetting behaviors of liquid metals, Applied Physics A (October 2017) v. 123(11), p.718.

3.2. Ожидаемые в конце 2018 года конкретные научные результаты

(форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы), до 5 стр.

((1)) 3D эффекты, плавление/испарение/рекристаллизация, произвольная длительность лазерного импульса

Будет построена теория, проведены численные расчеты и получено полное описание сложных явлений, которые имеют место при лазерном воздействии на толстые пленки. В практическом

плане вопрос представляет интерес в связи с лазерной печатью в случаях, когда переносу с донора на ресивер подлежат более крупные капли, чем те, которые образуются в случае тонких пленок (крупные капли нужны, например, для создания квантовых точек на ресивере). Будет полностью решен вопрос о толстых пленках при воздействиях на них со стороны прозрачных подложек (случай А). Такое направление воздействия проиллюстрировано на рис. 1 в приложенном п. 3.3. файле, если принять, что среда «frontal medium» - это прозрачная подложка, через которую освещается фронтальная граница пленки. А «rear-side medium» - это вакуум, в сторону которого вылетает крупная капля.

Будет проведен анализ ситуации с толстой пленкой, когда воздействие оказывается с вакуумной стороны, а пленка нанесена на подложку – т.е. на рис. 1 лазер светит снизу через вакуум, а пленка держится на подложке «frontal medium» (случай В). Заранее, т.е. на момент составления отчета за 2017-й год, неясно, удастся ли получить полное описание в данном случае. Конечно, вспенивание тонкого слоя со стороны вакуума мы увидим (это воздействия с умеренной энергетикой). Но непонятно, отделится ли металл от подложки при воздействии с повышенной энергетикой, если контакт с подложкой находится на значительной глубине. Ударная волна, которая идет со стороны облученной вакуумной границы к контакту в случае В, движет вещество около контакта в сторону противоположную вакуумной границе. Если разрыв контакта и происходит, то на поздних стадиях, как протекают которые сейчас не ясно.

В 2018 г. будут сделаны попытки объяснить полный унос толстой пленки над подложкой (как на правых двух кадрах на рис. 4 в приложенном п. 3.3. файле. Это нетривиальная задача. Как показывает энергетический баланс, до полного испарения всей толщины пленки 500 нм еще далеко. Да и кадры с куполом-пузырем на рис. 5 (e,f,g,k) свидетельствуют против полного испарения. На рисунках i, j, k показаны сечения пленки для соответствующих SEM кадров, см. связывающие стрелки. Они получены с помощью резки фокусированным ионным пучком (FIB, focused ion beam). Как видим, на кадрах i и j пленка прилегает к контакту с подложкой. И только на рис. 5 k пленка отслаивается от подложки. Эта картинка похожа на отслоение пленки под куполом в случае тонких пленок. Но подчеркнем, здесь пленка толстая. Поэтому аргумент с давлением на контакте, ускоряющем центр масс первоначально неподвижной пленки в сторону вакуума, здесь не проходит. Здесь возле контакта имеется импульс (количество движения вещества пленки), направленный в сторону подложки. Его несет волна сжатия, идущая от облученной границы к контакту. Конечно, подложка тормозит импульс натекающего металла, но может ли она повернуть его в обратную сторону? На этапе 2018 г. будет сделана попытка разобраться с этим вопросом.

К этому кругу относится и проблема с воздействием наносекундных импульсов. На этапе 2017 года подготовлены подходы к этой проблеме с помощью модели бесконечно тонкой оболочки. В 2018 г. решение будет окончено. Будут добавлены данные молекулярно-динамического моделирования и написана статья.

((2)) Фазовые пластинки и вихревые пучки электромагнитного излучения

С учетом фазовых переходов плавление/кристаллизация будет проанализировано гидродинамическое течение, которое создается действием малого по диаметру (1 - 10 мкм) вихревого лазерного пучка на поверхность металлической мишени.

((3)) Термомеханические эффекты при интерференции ЭМ волны и плазмонного поля, запись голограмм

В 2018 г. будет изучено влияние параметров и накоплены варианты расчетов. Работа будет
Проект № 14-19-01599/2017 Страница 68 из 73

вестись параллельно опытам. Далее будут выполнены проверки результатов, собраны беловые материалы и подготовлены публикации.

((4)) Мягкий рентген, косое падение, кольца Ньютона и построение интерферометрических изображений – расшифровка эксперимента.

Будут доведены до совершенства программы, описывающие воздействие мягкого рентгена косого падения для построения изображений и расшифровки достаточно шумной экспериментальной информации наших коллег из Kansai Photon Science Institute, QST. Будет теоретически и численно проработан вопрос об абляции мягким рентгеном при разной длительности импульса воздействия: порядка десятка фс от XFEL SACLA и 7 пс от SXRL KPSI.

((5)) Лазерная фрагментация капель

Будут подготовлены коды для моделирования лазерного диспергирования капель. Будет проанализирована физика диспергирования.

((6)) Рентгеновская и оптическая абляция рутения

В 2018 г. нами будет создана физическая модель рутения и будет проведено численное моделирование воздействия рентгеновского и оптического излучений. Будет разработан межатомный потенциал рутения (Ru имеет ГПУ решетку) и выполнено молекулярно-динамическое моделирование. Результаты будут сопоставлены с опытами, которые проводят наши коллеги в университете г. Твенте.

((7)) Формирование наночастиц при абляции золота в воду

Будут выполнены крупномасштабные молекулярно-динамические и гидродинамические расчеты. Важно пройти возможно более протяженный участок по времени, когда ударная волна в воде уходит на далекие расстояния от контакта вода-золото, контакт останавливается и давление на нем падает до низких значений.

((8)) Проверка двухтемпературной теплофизической модели тантала

В 2018 г. с помощью DFT (Density Functional Theory) вычислений будет уточнена двухтемпературная модель тантала. Будут вычислены указанные параметры модели. Понятно, что значения параметров определяют форму волны сжатия, которая возникает под действием лазерного импульса. Эта волна распространяется из нагретого поверхностного слоя. Считаем лазерный импульс (поглощенный флюенс, длительность и вообще временная форма) фиксированным. Сравним форму волны сжатия при большом и малом значении параметра электрон-ионного обмена. При большом значении релаксация идет быстро, слой прогрева получается тонким, а давление в нем велико. При малом значении импульса слой прогрева толще, а давление в нем ниже.

Время пробега пленки волной сжатия (и закон смещения тыльной границы пленки) будет разным при разных значениях коэффициента обмена. Это открывает путь к проверке параметров.

В данном разделе плана будем проверять влияние полувалентной 4f зоны тантала при нагревах выше 30 кК на параметры и, соответственно на форму волны сжатия. Сначала выполним такие проверки в расчетах. А затем предложим данную работу экспериментаторам.

В двухтемпературном гидродинамическом расчёте будут вычислены смещение задней границы пленки и глубина откольного кратера на фронтальной поверхности. Будет выяснено, как включение/исключение 4f-вклада в электронные теплоемкость, внутреннюю энергию, электрон-фононный теплообмен сказывается на смещении границы и глубине кратера.

((9)) Ультратонкие пленки молибдена

Наши коллеги из Lasercenter Munich, University of Applied Sciences собрали много уникальных данных по лазерному воздействию на пленки молибдена толщиной 10 нм. В 2018 г. нами будет создана физическая модель молибдена и проведено численное моделирование. Это позволит существенно уточнить теплофизические и оптические данные по этому тугоплавкому металлу.

3.3. Файл с дополнительной информацией (при необходимости)

(с графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта)

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

Подпись руководителя проекта _____/С.И.Анисимов/

Запрашиваемое финансирование по проекту
№ 14-19-01599
«Фемтосекундное лазерное плавление, кавитация и абляция в
трехмерной геометрии»,
на 2018 год

4.1. Планируемые расходы по проекту за счет средств, предоставляемых Фондом на следующий год (тыс. руб.)

Без учета неиспользованного остатка средств гранта предыдущих лет на начало планируемого года.

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	ВСЕГО	6000
	Вознаграждение членов научного коллектива (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды, без лиц категории «вспомогательный персонал»),	4900
	в том числе:	
	вознаграждение членов научного коллектива – исследователей в возрасте до 39 лет (включительно) Имеет информационный характер.	1715
	Вознаграждение лиц категории «вспомогательный персонал» (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	0
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды)	4900
2	Оплата услуг сторонних организаций на выполнение научного проекта Не более значений, предусмотренных соглашением.	0
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая монтаж, пусконаладочные работы, обучение работников и ремонт)	0
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	500
6	Накладные расходы организации Не могут превышать значений, предусмотренных соглашением.	600

4.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования средств гранта, расшифровка
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов во внебюджетные фонды) (указывается общая сумма вознаграждения, включая установленные трудовым законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний)
	4900
2	Оплата услуг сторонних организаций (приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая монтаж, пусконаладочные работы, обучение работников и ремонт) (представляется перечень планируемых к закупке оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования)
5	Иные расходы для целей выполнения проекта (приводится классификация иных затрат на цели выполнения проекта, в том числе - расходы на командировки, связанные с выполнением проекта или представлением результатов проекта, оплату услуг связи, транспортных услуг, иное; расходы не расшифровываются)

Подпись руководителя проекта _____/С.И. Анисимов/

Подпись руководителя организации (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности (письменного уполномочия)), **печать** (при ее наличии) **организации.**

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру отчета прилагается доверенность (копия письменного уполномочия или доверенности, заверенная печатью организации).

_____/_____/_____
М.П.

Изменения в составе участников

Петров Юрий Васильевич

Жаховский Василий Викторович

Иногамов Наиль Алимович