

Название проекта:

Физика лазерного воздействия на материалы: теория, моделирование и приложения

1.3. Ключевые слова

Создание наноструктур и метаповерхностей, лазер и плазмоника, абляция в жидкость, фрагментация капель, компьютерная физика

1.4. Аннотация проекта

С пучками частиц и света связаны новаторские технологии обработки. Поток электронов, сфокусированный ионный пучок (FIB) и лазерное воздействие – вот новые инструменты, на много порядков повышающие прецизионность изготовления по сравнению, скажем, со сверлом, традиционно применяемом в машиностроении. С другой стороны, лазеры непрерывного действия и порошковые мишени при 3Д-печати позволяют легко обойти проблемы топологического плана, которые неизбежны при обычных путях создания сложных трехмерных объектов, например, решетчатых изделий или изделий с запутанной внутренней геометрией. В настоящем проекте рассматриваются фундаментальные проблемы, которые возникают именно в лазерных приложениях, поскольку лазерное микро-структурирование существенно экономичнее, чем абляция с помощью электронов или FIB.

При этом электронный микроскоп и FIB тоже применяются в проекте, но в качестве диагностического оборудования, при совместной работе с экспериментаторами, см., например, [1-3].

Перспективные и уже используемые технологии, которые изучаются в данной заявке, основаны на тонком управлении пространственно-временными распределениями вложенной лазерной энергии. Управление осуществляется двумя способами. Во-первых, путем возбуждения поверхностных плазмон-поляритонных (ППП) мод [4]. И, во-вторых, путем применения сложных пучков [2,5] – здесь говорится о формирующих пучок фазовых пластинках и вихревом воздействии в оптике [5] или в рентгене [2].

Речь идет об изготовлении голограмм, метаповерхностей, метаматериалов, т.е. материалов со свойствами, которые не встречаются среди естественных веществ [1]. Появление необычных характеристик обусловлено точным упорядочиванием, структурированием на микро- и на наноуровне для использования интерференционных эффектов между светом и ППП электромагнитными (ЭМ) полями [1]. Именно для этого требуется прецизионность.

Другими важными, но не исследованными или недостаточно исследованными направлениями в нашем проекте являются абляция металлов и полупроводников в жидкость [6], лазерная фрагментация жидких капель [7], абляция тугоплавких металлов и спекание/плавление порошковых мишеней [8].

Накопленный в коллективе опыт позволяет в настоящей заявке взяться за эти сложные, нужные для приложений проблемы.

Обсудим актуальность и новизну. Возбуждение ППП мод электромагнитным (ЭМ) излучением лазера обсуждается давно [9]. В этих работах ищется резонанс между приходящей плоской ЭМ волной и соответствующей ППП модой с равной частотой, представленную в спектре ППП мод. Спектр ППП мод связан со случайной начальной шероховатостью отражающей поверхности. Интерференция ЭМ волны лазера и ПП-поляритонов бесспорно влияет на формирование поверхностных периодических структур LIPSS (laser induced periodic surface structures). Для создания LIPSS используют широкий пучок (много длин волн укладывается в пятне на поверхности) и многократное облучение. LIPSS вырастает постепенно «из ничего». Пространственный период LIPSS контролируется плохо.

В предлагаемом нами подходе сразу создается ППП мода с частотой по времени, требуемой для интерференции с лазером. В предыдущей нашей работе для этого использовалась конфигурация Кретчманна [4]. В новом проекте источником ППП поля является локализованное пространственное возмущение на поверхности в виде бугорка-купола. Процессы формирования такого бугорка одиночным выстрелом изучены в наших предыдущих работах [10]. ЭМ волна второго выстрела в ту же точку или рядом с ней, во-первых, генерирует бегущую ППП моду с нужной частотой и, во-вторых, интерферирует с этой ППП модой, создавая стоячую волну. В результате действия стоячей волны вместо бугорка возникает сложная картина впечатанной в материал пространственной интерференции, наблюдавшаяся нашими коллегами [11]. Мы создадим физическую модель и объясним, как происходит впечатывание стоячей волны, как управлять картиной, каковы оптимальные условия (фокусировка, длительность, интенсивность) - в этом заключается новизна по сравнению с работами [4] и [11]. Актуальность задачи связана с проблемами создания метаматериалов.

Исключительно востребованными являются работы по физическим моделям и моделированию абляции металлов в жидкость с формированием наночастиц. Актуальность соответствующих приложений в электронике, катализе, нанотехнологиях, биомедицине детально освещена в недавних обзорах [12]. На сегодня отсутствует описание того, как образуются наночастицы, и каким образом они попадают в жидкость. Описана только начальная стадия процесса [6] и конечная стадия с пузырьком [13]. Изученный участок начальной стадии [6] еще очень далек от образования пузырька. Тогда как конечная стадия опирается на довольно простой подход с уравнением Релея-Плессета в сферической геометрии [13]. Такой подход никак не связан с абляцией на начальной стадии, которая протекает в одномерной геометрии – диаметр пятна нагрева порядка

долей миллиметра, а толщина слоя прогрева порядка 100 нм. В нашей работе по проекту будут созданы теория и вычислительный аппарат всех стадий процесса от поглощения лазерной энергии до формирования пузырька и перехода наночастиц в парожидкостную смесь на примере воды. Подход будет опираться на уравнения состояния и межатомные потенциалы взаимодействия металлов и воды. Уравнения состояния используются в гидродинамических расчетах, а потенциалы взаимодействия – при молекулярно-динамическом моделировании.

Сложнейшими являются задачи с лазерным дроблением капель. Лазерное воздействие порождает резко нестационарное трехмерное многомасштабное течение, в котором важен учет всех факторов от горячей плазмы до эффектов прочности/разрушения и капиллярного разбрызгивания [7,14]. Нам удалось создать код, описывающий фрагментацию микрокапли олова, см. [7] и кино в файле «SV.mp4», (доступны на сайте <http://laser.itp.ac.ru/RNF2019/index.html>, см. комментарии в ссылке [7]). Физическая модель, разработанная нами, включает в себя EAM (embedded atom method) потенциал взаимодействия атомов жидкого олова. Фрагментация оловянной капли – это важный раздел комплексной программы, относящейся к созданию литографических машин будущего. В таких машинах резко уменьшена длина, связанная с дифракционным пределом, поскольку используется вакуумный ультрафиолет с энергией фотона 90 эВ и длиной волны ЭМ излучения 13.5 нм. Задача разрабатывалась совместно с сотрудниками института спектроскопии РАН и ОИВТ РАН.

В новом проекте будет решена задача о воздействии лазерного луча жесткого рентгена (фотон 8 кэВ, длительность импульса 30 фс) на микрокаплю воды. Соответствующие опыты [14] были выполнены недавно на приборе Coherent X-ray Imaging (CXI) на линейном ускорителе в Стэнфорде (Linac Coherent Light Source - LCLS). В расчетах будет использована двухтемпературная гидродинамика и новая модификация нашего многопроцессорного SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) кода [15] вместе с детальными сведениями о характеристиках воды.

Будет решена задача об абляции рутения. Это важный малоисследованный тугоплавкий металл, который применяется в рентгеновской оптике. Будет создан межатомный потенциал рутения, что не просто из-за необходимости его подгонки к большому поверхностному натяжению и высокой температуре плавления плюс дополнительные сложности кристаллографического плана (гексагональная плотноупакованная решетка задается двумя параметрами). Будет создано уравнение состояния с учетом двухтемпературных эффектов. На этой основе будут проведены двухтемпературные гидродинамические и молекулярно-динамические расчеты. Работа будет вестись совместно с экспериментом. Будут рассмотрены ультракороткие воздействия лазеров с разной длиной волны от оптического до жесткого ультрафиолета и до жесткого рентгена под разными углами падения.

Будут проведены исследования по плавлению порошков микрочастиц лазерным импульсом. Это важная новая тематика, которая мало изучена в отношении создания физических моделей и кодов для анализа происходящих процессов.

Будет продолжено совершенствование SPH кода в направлении включения фазовых переходов. Это высокопроизводительный многопроцессорный код, который используется в проекте в задачах об абляции в воду, дроблении капель и термогидродинамики порошков. Очень важно, что код не имеет пространственно-временных ограничений в отличие от молекулярной динамики, ограниченной масштабами порядка микрона и временами порядка десятков наносекунд. Разработанный в нашем коллективе SPH код VMD3 (Voronoi Material Dynamic Domain Decomposition) [15] эффективен при описании разрушения и фрагментации в многомерной геометрии.

Будут изучены характеристики кремния в зависимости от лазерного воздействия. Они важны для исследования вопроса о формировании наноструктур на кремнии.

Литература

[1] X.W. Wang, A.A. Kuchmizhak, X. Li, S. Juodkasis, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, V.V. Zhakhovsky, P.A. Danilov, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, and N.A. Inogamov, Laser-Induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: Noninvasive Characterization and Predictive Modeling via Mapping at Nanoscale, Phys. Rev. Appl. V. 8, 044016 (2017)

П.А. Данилов, Д.А. Заярный, А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Руденко, А.А. Кучмижак, О.Б. Витрик, Ю.Н. Кульчин, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, Перераспределение материала при фемтосекундной лазерной абляции тонкой серебряной пленки, Письма в ЖЭТФ, 2016, 104, 780-786 [P.A. Danilov, D.A. Zayarny, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, A.A. Kuchmizhak, O.B. Vitrik, Yu.N. Kulchin, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, Redistribution of a Material at Femtosecond Laser Ablation of a Thin Silver Film, JETP Lett. V. 104(11), 759-765 (2016)]

A. Kuchmizhak, O. Vitrik, Yu. Kulchin, D. Storozhenko, A. Mayor, A. Mirochnik, S. Makarov, V. Milichko, S. Kudryashov, V. Zhakhovsky, N. Inogamov, Laser printing of resonant plasmonic nanovoids, Nanoscale V. 8, 12352-12361 (2016)

[2] Yoshiki Kohmura, Vasily Zhakhovsky, Dai Takei, Yoshio Suzuki, Akihisa Takeuchi, Ichiro Inoue, Yuichi Inubushi, Nail Inogamov, Tetsuya Ishikawa, and Makina Yabashi, Nanostructuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration, Appl. Phys. Lett. V. 112, 123103 (2018)

[3] 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 Letters, V. 95(4), 176-181 (2012)

[4] A.I. Ignatov, V.V. Zhakhovsky, A.M. Merzlikin, and N.A. Inogamov, Thermomechanical ablation under plasmonic field excited by ultrashort laser pulse. Part I: Plasmonics, Journal of Physics: Conf. Series V. 1092, 012051 (2018).

A.I. Ignatov, V.V. Zhakhovsky, A.M. Merzlikin, and N.A. Inogamov, Thermomechanical ablation under plasmonic field excited by ultrashort laser pulse. Part II, Journal of Physics: Conf. Series V. 1092, 012052 (2018).

[5] Kohei Toyoda, Katsuhiko Miyamoto, Nobuyuki Aoki, Ryuji Morita, and Takashige Omatsu, Using Optical Vortex To Control the Chirality of Twisted Metal Nanostructures, Nano Lett. V. 12 (7), 3645-3649 (2012) DOI: 10.1021/nl301347j (200 ссылок на эту статью);

Fuyuto Takahashi, Katsuhiko Miyamoto, Hirofumi Hidai, Keisaku Yamane, Ryuji Morita & Takashige Omatsu, Picosecond optical vortex pulse illumination forms a monocrystalline silicon needle, Scientific Reports V. 6, Article number: 21738 (2016);

S. Syubaev, A. Porfirev, A. Zhizhchenko, O. Vitrik, S. Kudryashov, S. Fomchenkov, S. Khonina, and A. Kuchmizhak, Zero-orbital-angular-momentum laser printing of chiral nanoneedles, Optics Letters, V. 42, No. 23, 5022-5025 (2017)

[6] Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, Динамика абляции золота в воду, ЖЭТФ, т. 154, вып. 1(7), стр. 92-123 (2018); [N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, V.A. Khokhlov, Dynamics of Gold Ablation into Water, JETP, 2018, 127, 79-106]

Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, В.В. Жаховский, Формирование уединенной микроструктуры и абляция в прозрачный диэлектрик при субнаносекундном лазерном воздействии, Письма в ЖЭТФ, Т. 108 (7), 470-477 (2018) [N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Formation of a Single Microstructure and Ablation into a Transparent Insulator under Subnanosecond Laser Irradiation, JETP Lett., 2018, 108, 439-445]

[7] S.Yu. Grigoryev, B.V. Lakatosh, M.S. Krivokorytov, V.V. Zhakhovsky, S.A. Dyachkov, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, A.Yu. Vinokhodov, V.O. Kompanets, Yu.V. Sidelnikov, V.M. Krivtsun, K.N. Koshelev, and V.V. Medvedev, Expansion and fragmentation of liquid metal droplet by a short laser pulse, Phys. Rev. Appl. Accepted October 25.

Статья в виде файла

http://laser.itp.ac.ru/RNF2019/Grigoryev_etal._Phys.Rev.Appl_Accepted_October25.pdf и двух кинограмм в <http://laser.itp.ac.ru/RNF2019/SV.mp4> доступна на сайте

<http://laser.itp.ac.ru/RNF2019/index.html>. Кино поясняет сказанное в статье.

[8] H. Mindt, M. Megahed, N. Lavery, M. Holmes, S. Brown, Powder Bed Layer Characteristics: The Overseen First-Order Process Input, Metallurgical & Materials Transactions. Part A, V. 47, Issue 8, 3811-3822 (2016)

[9] J.E. Sipe, Jeff F. Young, J.S. Preston, and H.M. van Driel, Laser-induced periodic surface structure. I. Theory, Phys. Rev. B, V. 27, No. 2, 1141-1154 (1983).

С.А. Ахманов, В.И. Емельянов, Н.И. Воротеев, В.Н. Семиногов, Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика, УФН, т. 147, 675–745 (1985) [S.A. Akhmanov, V.I. Emel'yanov, N.I. Koroteev V.N. Seminogov, Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics, Sov. Phys. Usp., 1985, 28, 1084]

[10] Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, Формирование наноразмерных струек и капель ультракоротким лазерным импульсом при фокусировке на дифракционном пределе, Письма ЖЭТФ 100 (1), 6-12 (2014) [N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, Formation of nanojets and nanodroplets by an ultrashort laser pulse at focusing in the diffraction limit, JETP Letters, 2014, 100, 4-10].

Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, Струеобразование при отрыве металлической пленки от подложки в результате воздействия фемтосекундного лазерного импульса, ЖЭТФ 147 (1), 20-56 (2015) [N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, V.A. Khokhlov, Jet Formation in Spallation of Metal Film from Substrate under Action of Femtosecond Laser Pulse, JETP, 2015, 120, 15–48].

N. A. Inogamov and V. V. Zhakhovsky, Surface 3D nanostructuring by tightly focused laser pulse: simulations by Lagrangian code and molecular dynamics, Journal of Physics: Conference Series V. 681, 012001 (2016).

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 V. 122, 432 (9 pages) (2016).

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, Yu.V. Petrov, and K.P. Migdal, Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse, Nanoscale Research Letters V. 11, 177 (2016).

С.И.Анисимов, В.В.Жаховский, Н.А.Иногамов, С.А.Мурзов, В.А.Хохлов, О формировании и кристаллизации жидкой струи, возникающей при воздействии на пленку остросфокусированным лазерным пучком, Квантовая электроника, т. 47, № 6, 509-521 (2017) [S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovskii, N.A. Inogamov, S.A. Murzov, V.A. Khokhlov, Formation and crystallisation of a liquid jet arising under irradiation of a film by a tightly focused laser beam, Quantum Electron., 2017, 47 (6), 509–521].

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, Laser ablation caused by geometrically constrained illumination and inventive target design, Journal of Physics: Conf. Series V. 946, 012008 (2018)

[11] 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, Optics Lett. V. 40, No. 8, 1687-1690 (2015).

[12] D. Zhang, B. Goekce, and S. Barcikowski, Laser Synthesis and Processing of Colloids: Fundamentals and Applications, Chem. Rev. V. 117, No. 5, 3990-4103 (2017)

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 V. 87, 140-220 (2017)

[13] Julien Lam, Julien Lombard, Christophe Dujardin, Gilles Ledoux, Samy Merabia, and David Amans, Dynamical study of bubble expansion following laser ablation in liquids, Appl. Phys. Lett. V. 108, 074104 (2016)

[14] Claudiu A. Stan, Despina Milathianaki, Hartawan Laksmono, Raymond G. Sierra, Trevor A. McQueen, Marc Messerschmidt, Garth J. Williams, Jason E. Koglin, Thomas J. Lane, Matt J. Hayes, Serge A. H. Guillet, Mengning Liang, Andrew L. Aquila, Philip R. Willmott, Joseph S. Robinson, Karl L. Gumerlock, Sabine Botha, Karol Nass, Ilme Schlichting, Robert L. Shoeman, Howard A. Stone and Sébastien Boutet, Liquid explosions induced by X-ray laser pulses, Nature Phys. V. 12, 966–971 (2016). DOI: 10.1038/NPHYS3779;

Claudiu A. Stan, Philip R. Willmott, Howard A. Stone, Jason E. Koglin, Mengning Liang, Andrew L. Aquila, Joseph S. Robinson, Karl L. Gumerlock, Gabriel Blaj, Raymond G. Sierra, Sébastien Boutet, Serge A. H. Guillet, Robin H. Curtis, Sharon L. Vetter, Henrik Loos, James L. Turner, and Franz-Josef Decker, Negative Pressures and Spallation in Water Drops Subjected to Nanosecond Shock Waves, J. Phys. Chem. Lett. V. 7(11), 2055–2062 (2016)

[15] M.S. Egorova, S.A. Dyachkov, A.N. Parshikov and V.V. Zhakhovsky, Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains, Computer Physics Communications, V. 234, 112 – 125 (2019). DOI: 10.1016/j.cpc.2018.07.019

1.5. Ожидаемые результаты и их значимость (указываются ожидаемые результаты и их научная и общественная значимость (оценка соответствия запланированных результатов мировому уровню исследований, возможность практического использования запланированных результатов проекта в экономике и социальной сфере))

А) Пространственно распределенный нагрев за счет комбинации плазмонных и лазерных ЭМ полей.

Широкие возможности создания сложных пространственных структур на поверхности связаны с интерференцией плазмонного и лазерного ЭМ полей (мотивация: изготовление голограмм, метаповерхностей). Плазмонная волна создается тем же лазерным импульсом на пространственной неоднородности плоской поверхности мишени. Вследствие интерференции формируется стоячая волна. В стоячей волне максимумы нагрева находятся в пучностях (горячие гребни). Между гребнями располагаются узлы, в которых нагрева нет. Нас интересуют амплитуда воздействий, которая достаточна для полного

или частичного плавления пленки. Длительность импульса меньше времени механического отскока тонкой пленки от подстилающей диэлектрической подложки и меньше времени перетока тепла из пучностей в узлы.

Будет промоделировано формирование купола первым выстрелом. Для этого будет использован ранее разработанный подход, см. ссылки [10] к пункту 1.4 и кино в виде файлов "Au-220.gif", "Au-225.gif" и "Au-226.avi" на сайте <http://laser.itp.ac.ru/RNF2019/index.html>. Будет рассчитано средствами численной электродинамики ближнее ЭМ стоячей волны, связанной с лазером, поверхностью и куполом. Будет рассчитан нагрев пленки в стоячем поле за счет поглощения ЭМ поля стоячей волны в скин-слое пленки. Будет промоделировано методами молекулярной динамики и SPH как движение пленки, так и тепловые процессы в движущейся пленке. В результате будут получены данные относительно порогов формирования и о характеристиках пространственной структуры, состоящей из купола и отпечатка стоячей волны в пленке и подложке. Результаты будут сопоставлены с экспериментом из ссылки [11] к пункту 1.4 и новыми опытами Владивостокской группы.

Будет понято, что происходит вследствие освещения указанной выше структуры третьим выстрелом. Для этого будет выполнено дополнительное электродинамическое моделирование.

На сегодня в мировой литературе нет ни описания, ни решения такой проблемы. Это обусловлено трудностями создания физической модели и численной схемы, которая сопрягает электродинамический расчет с тепло-гидро-физическим моделированием. От разработки проблемы есть существенная польза, связанная с технологиями создания метаповерхностей и голограмм.

Будет объяснено формирование радиальной гофрировки на куполах, см. пример, показанный на рис. 1. Хотя наблюдения зафиксировали данные структуры достаточно давно (с работы Wortmann et al., J. Laser Appl. V. 24, 042017 (2012) прошло 6 лет), никаких объяснений до сих пор не представлено.

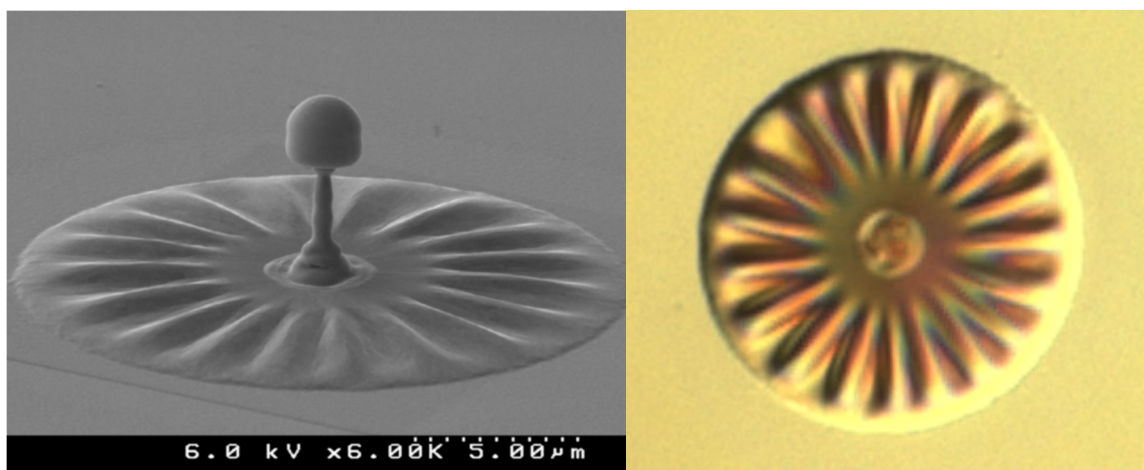


Рис. 1. Вид сбоку и сверху на осевший и застывший купол. Видна радиальная гофрировка купола. Michael R. Armstrong Lawrence Livermore National Laboratory (личное сообщение), см. также <https://simes.stanford.edu/events/mike-armstrong-simes-seminar/>. Аналогичные наблюдения делались в группе проф. Б.Н. Чичкова: Wortmann et al., Journal of Laser Applications V. 24, 042017 (2012); doi: 10.2351/1.4734048

Б) Действие вихревых пучков.

Относительно недавно аудитория, работающая в области лазерных применений, была в достаточной мере шокирована работами [5] (см. литературу к п. 1.4; несколько статей в Nature) по вихревым пучкам с острой фокусировкой (т.е. с размером пятна на облучаемой мишени порядка длины волны). Типичные образования в виде закрученных спиралевидных острий показаны на рис. 2.

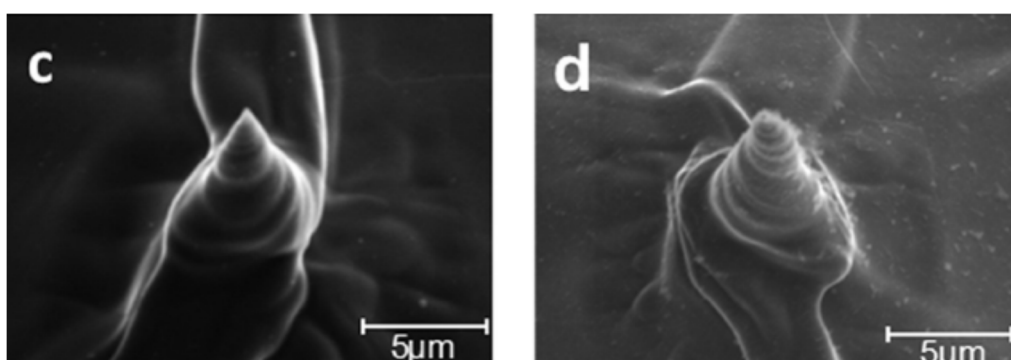


Рис. 2. Закрученные заостренные вершины, возникающие после воздействия вихревого пучка. Иллюстрация взята из статьи Toyoda et al., Nano Lett. (2012) DOI: 10.1021/nl301347j (200 ссылок на эту статью), см. [5] в п. 1.4.

Авторы работ из группы проф. Т. Оматцу увязывают формирование хиральных структур (см. рис. 2) с угловым моментом, приносимым фотонами вихревого пучка. Причем при

создании подобных закрученных острий авторы используют лазеры с разной длительностью импульса и разные мишени. Но никаких количественных расчетов, которые бы объясняли происхождение структур, на сегодня не имеется.

В проекте будет создана теория, найдено объяснение феномену, решена эта задача и проведены численные расчеты. Результаты будут сопоставлены с опытами, которые ведутся в ФИАНе в отделении проф. А.А. Ионина.

Работа представляется практически значимой. Она представляет собой новый вариант фундаментальной проблемы, относящейся к взаимодействию лазерного излучения с веществом. Такая вихревая обработка открывает широкие дополнительные технологические возможности: фильтрация молекул на базе их хиральности, формирование хиральных плазмонных устройств (освещение структуры возвращает в отраженном свете вихревую волну), создание высокочувствительных сенсоров и др. см. [5] в п. 1.4.

В) Образование наночастиц при абляции в жидкость.

Будет решена весьма трудная проблема об абляции металла в жидкость. Эта проблема актуальна в силу ее востребованности во многих приложениях, см. обзоры [12] в списке литературы к пункту 1.4; по проблеме проводятся международные конференции, см. сайт конференции ANGEL этого года: <http://angel-conference.org/en>. В настоящее время имеются только самые первые попытки решения данной проблемы, важной для оптимизации очень затратных (в смысле стоимости) технологий [12] лазерной фабрикация наночастиц. Эти попытки покрывают только или начальную (см. [6] в пункте 1.4), или конечную (см. [13] в п.1.4) стадии имеющих место процессов.

В работе по проекту будет получено исчерпывающее сквозное решение, которое охватывает начальную стадию, следует за развитием явлений на нескольких промежуточных стадиях и непрерывно переходит на стадию парообразования в горячем приконтактном слое жидкости с возникновением парового пузырька, его расширением, остановкой и началом возвратного движения, приводящего к сжатию пузырька. Успех такой работы сильно помог бы группам, занимающимся фабрикацией наночастиц. Расчеты сначала будут выполнены для случая воды. Будут использована детальная информация, имеющаяся в литературе по свойствам воды.

Г) Лазерная фрагментация жидких капель и струй.

Очень сложными являются задачи о фрагментации жидких микрокапель путем лазерного воздействия. Трудности связаны с богатой физикой (от взаимодействия излучения и создания экстремальных условий по температуре и давлению до капиллярных явлений) и резко нестационарным трехмерным характером течений.

Причем структура течения иерархическая, покрывает несколько порядков во времени и в пространстве: от быстрых до медленных процессов и по пространственной шкале от порядка размера капли до мельчайших фрагментов дробления. У нас есть положительный опыт решения проблемы, см. ссылку [7] в п. 1.4.

В проекте будет решена задача о воздействии тонким цилиндрическим пучком жесткого рентгена на микрокаплю воды или на жидкую струю. Диаметр пучка 1 мкм, размер капли и диаметр струи – несколько десятков мкм. Постановка задачи показана на рис. 3.

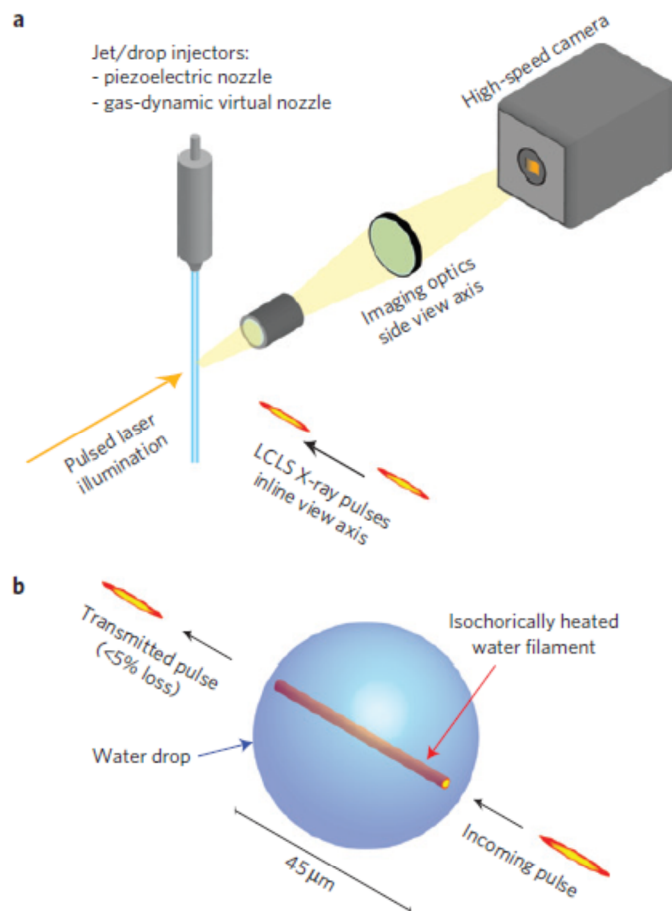


Figure 1 | Inducing liquid microexplosions with ultraintense X-ray pulses.
a, Experimental design. Pulses from an X-ray free-electron laser, focused to a $\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ beam diameter, intercept water droplets (32 to $45\text{ }\mu\text{m}$ diameter) or water jets (2.75 to $30\text{ }\mu\text{m}$ diameter) flowing in a vacuum chamber. The subsequent phenomena are imaged optically, after a variable delay time, using a femtosecond laser for illumination. **b**, Schematic of the energy deposition process. A focused femtosecond X-ray pulse passes undeflected through the drops, and a small fraction of the pulse energy is absorbed in the drop, heating isochorically a micrometre-wide filament of water to average energy densities tens to hundreds of times higher than those needed to vaporize water.

Рис. 3. Рисунок иллюстрирует постановку опытов. Взят из первой из работ в ссылке [14] в п. 1.4.

Типичные данные опытов, проведенных на Стэнфордском ускорителе (SLAC) на рентгеновском лазере на свободных электронах Linac Coherent Light Source (LCLS), показаны на рис. 4. Использован прибор Coherent X-ray Imaging (CXI).

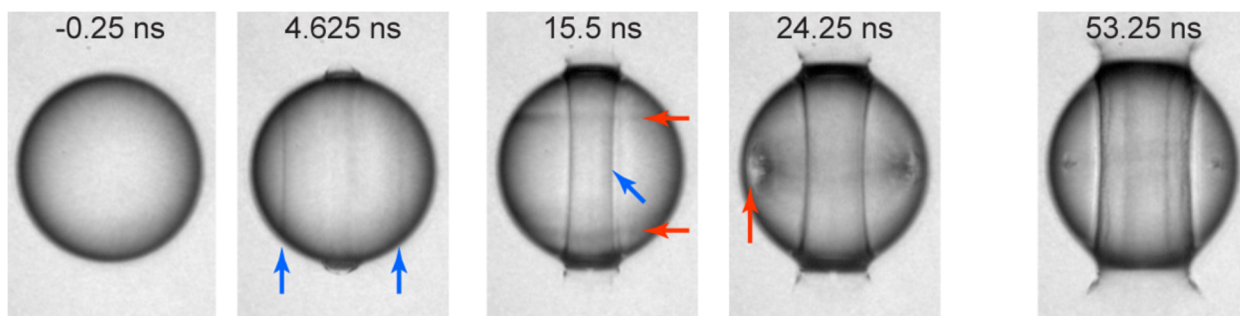


Figure 1. (a) Experimental design. A focused, ultraintense X-ray laser pulse deposits energy in microdrops of water, forming a high-pressure filament that launches a shock wave and forms a cavity inside a drop. These processes are investigated using time-resolved, bright-field optical imaging. (b) Images of $55\ \mu\text{m}$ diameter water drops during the experiments. For each column in the array of images, the solid arrows indicate the location of the phenomena listed at the bottom of the column, in the same font color as the arrows. The shock waves are visible as straight lines; they are reflected from the surface of the drops into negative pressure waves that can lead to cavitation or spallation inside the drop. Spallation produces a void–liquid interface that reflects the illumination light and leads to the appearance of bright regions in the images.

Рис. 4. Рисунок взят из статьи Stan et al., J. Phys. Chem. Lett. V. 7(11), 2055–2062 (2016).

Рисунок иллюстрирует картину разлета и фрагментации жидкой капли воды после ультракороткого (30 фс) воздействия тонкого цилиндрического пучка жесткого рентгена (8 кэВ) – на рисунке идет вертикально по центральному диаметру. В результате ультракороткого воздействия образуется расширяющаяся колонка, заполненная горячей плазмой низкой плотности.

Для решения проблемы, представленной на рис. 3 и 4, будет модифицирован комплекс программ и добавлены новые подходы, как в физике, так и в используемых алгоритмах. По физике речь идет об описании взаимодействия рентгеновского пучка и в описании двухтемпературных явлений. Большой опыт исследования рентгеновских воздействий в коллективе имеется [1]. Тоже относится к двухтемпературным моделям [2]. В алгоритм SPH будут встроены подпрограммы с рентгеновской физикой и двухтемпературными эффектами, а также детальные сведения об уравнении состояния воды.

Кроме проблемы с жестким импульсным рентгеном и каплей воды, будут продолжены исследования по капле олова. Предстоит заменить уравнение состояния Ми-Грюнайзена, применявшееся в работе [7] (см. литературу к п. 1.4), на табличное уравнение состояния.

Д) Абляция тугоплавких металлов.

Первым в заявке в разделе по тугоплавким веществам является пример с рутением. Это важный конструкционный материал, который применяется в рентгеновской оптике. Поэтому необходимо исследовать его поведение в различных режимах облучения.

Будет создан потенциал межатомного взаимодействия рутения. Будет разработано уравнение состояния рутения с учетом двухтемпературных эффектов. Для разработки потенциала и для создания уравнения состояния будут проведены DFT(density functional theory) расчеты. Они будут выполнены с помощью пакетов квантово-механических вычислений (VASP, Elk и др.). В таких расчетах определяется холодная кривая рутения. Она необходима для построения потенциала межатомного взаимодействия методом согласования по стрессу (stress-matching). В DFT вычислениях будут определены двухтемпературные эффекты. Для этого будет выполнена серия расчетов по электронной температуре, в которых в ГПУ кристалле рутения возбуждается электронная подсистема до заданной температуры. В результате определяются электронные вклады в давление и внутреннюю энергию, и находится электронная теплоемкость. Эти величины являются нетривиальными функциями плотности и температуры. Их нельзя аппроксимировать функциями, которые соответствуют свободному Ферми-газу.

Далее будут выполнены двухтемпературные гидродинамические и молекулярно-динамические расчеты. Работа будет вестись совместно с экспериментом. Будут рассмотрены ультракороткие воздействия лазеров с разной длиной волны от оптического до жесткого ультрафиолета и до жесткого рентгена под разными углами падения. Нашим коллективом начаты предварительные работы по данному направлению [3].

Е) Лазерное плавление порошков.

Важной и сложной является проблема плавления порошков с помощью лазерного пучка. Важность проблемы связана с современными технологиями трехмерной печати изделий. При таком подходе некоторые трудные вопросы, относящиеся к изготовлению изделий сложной формы, снимаются, см. п. 1.4. Изготовление изделий путем плавления порошков оказывается дешевле и технически проще, чем традиционные методики, связанные с отливками. С другой стороны исследования в этой области на сегодня находятся в начальном состоянии. Анализируется механика сыпучих сред (soft matter) [4,5] в связи с вопросом наполнения камеры порошком до плавления. А вот проблема плавления фактически остается нерешенной.

Пока исследователи рассматривают задачи о озерце расплава (melting pool), говорят про термокапиллярную конвекцию, вызванную зависимостью коэффициента поверхностного натяжения от температуры (эффект Марангони). При этом вопрос о плавлении собственно порошка остается неисследованным. Здесь нельзя применять постановку в духе задачи Стефана, поскольку среда не является однородной.

В нашем коллективе есть опыт решения задач метания порошков ударной волной и опыт анализа ударной компрессии пористых сред. Но задача о плавлении стоит особняком. Давления относительно небольшие, ударная компактификация места не имеет. Необходимо сосредоточиться на термодинамике и кинетике плавления, на тепловых

эффектах, а затем на вопросах ре-кристаллизации расплава. По проблеме затвердевания жидкой фазы в нашей группе выполнено достаточно много работ.

В проекте будет решена задача о плавлении порошка металлических микрочастиц лазерным импульсом.

Ж) Вычислительная физика, крупномасштабное высокопроизводительное численное моделирование.

Важнейшую роль в исполнении проекта будут играть вычислительные методики. В нашем распоряжении мощные эффективные гидродинамические и молекулярно-динамические коды. В работе по проекту эти коды будут совершенствоваться и наполняться новой физикой. Развитие кодов само по себе является практически важной задачей. Будут развиты и применены:

(1) одномерная двухтемпературная гидродинамическая программа в лагранжевых координатах с полной физикой (поглощение, теплопроводность, электрон-ионный обмен) и табличным уравнением состояния, примеры применения см. в [6] в списке литературы к п. 1.4; программа будет использоваться применительно к задачам А, Б, В, Г, Д;

(2) многопроцессорная высокопроизводительная программа молекулярно-динамического моделирования с глубоким распараллеливанием. В настоящее время разработана важная модификация программы, которая включает в себя блок Монте-Карло. Это позволяет моделировать задачи плавления и рекристаллизации металлов. Как известно, в металлах электронная теплопроводность намного превосходит теплопроводность, связанную с тепловым движением ионов.

Разработана методика масштабирования расчета по капиллярному и тепловому безразмерным параметрам. Масштабирование по размерам и времени опирается на полную свободу в задании коэффициента электронной теплопроводности κ в блоке Монте-Карло, а также на некоторую свободу в вариации коэффициента поверхностного натяжения σ . Изменение коэффициента κ никак не сказывается на характеристиках вещества, моделируемого с помощью ЕАМ (embedded atom method) межатомного потенциала. К этим характеристикам относятся: сжимаемость, коэффициент теплового расширения, энергия образования дефектов, температура плавления, и др.; для построенного ЕАМ эти значения с хорошей точностью соответствуют табличным значениям для данного вещества.

Это и понятно, п.ч. блок Монте-Карло является внешним по отношению к собственно молекулярно-динамической программе.

Поверхностное натяжение также регулируется в направлении уменьшения по сравнению с реальным значением примерно в два раза. В.В. Жаховским разработаны версии ЕАМ

для одного вещества с разными значениями σ . При этом перечисленные выше характеристики (сжимаемость и т.д.) остаются соответствующими табличным величинам. При этом давление насыщенного пара и положение критической точки несколько меняются.

Техника масштабирования позволяет нам существенно расширить пространственно-временные пределы применения молекулярной динамики (МД). Обычно верхним пределом для МД являются размеры порядка микрона и времена порядка десятков наносекунд. МД код с Монте-Карло расширением или без него будет применен при решении всех перечисленных выше проблем А-Е.

(3) Будет разработаны усовершенствованные модели материалов для применения в SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) коде. Этот код будет использоваться при решении проблемы В в списке выше; В – абляция в жидкость. С помощью SPH кода мы снимем ограничения по линейным размерам и по длительности моделируемого периода времени; такие ограничения присущи молекулярно-динамическому коду.

Новые физические модели для SPH расчетов включают в себя табличные уравнения состояния материалов с фазовыми превращениями и модели прочности вещества на разрыв в твердом и жидком состояниях в широком диапазоне температур и скоростей деформации. Будет выполнена большая трудная работа по учету в SPH коде капиллярных эффектов.

Код SPH будет приспособлен для решения проблемы Г-дробление капли или струи воды узким пучком жесткого рентгена из американского XFEL/LCLS (x-ray free electron laser/ Linac Coherent Light Source) лазера на линейном ускорителе SLAC в Стэнфорде.

С помощью модификации кода SPH будет выполнено моделирование задачи о лазерном сильном нагреве и плавлении мезоскопических объектов – порошков микрочастиц (задача Е в списке выше).

(4) Будет разработан новый потенциал межатомного взаимодействия рутения с помощью подхода, комбинирующего метод катящегося многоугольника (симплекс) с Монте-Карло случайными блужданиями. Параметры потенциала подгоняются посредством сравнения по напряжениям (stress-matching). Зависимости напряжений от плотности и ориентации кристалла при низкой температуре (холодные кривые) находятся с помощью DFT (density functional theory) вычислений – см. следующий пункт. Холодные кривые требуются для stress-matching.

(5) Применение пакетов квантово-механических DFT (density functional theory) вычислений VASP, Elk и др. при конструировании межатомного потенциала взаимодействия рутения.

(6) Применение пакетов COMSOL Multiphysics© и LS-DYNA для решения проблем в задачах А, Б.

(7) В качестве важнейшего инструмента в нашем коллективе применяются комбинации программ и основанные на этом гибридные подходы. Это позволяет в приемлемые сроки описать задачи, которые кажутся нерешаемыми на первый взгляд.

Именно так была решена задача о дроблении капли олова лазерным ударом по освещаемой полусфере шаровидной капли, см. работу [7] в списке литературы к п. 1.4. Дело в том, что код SPH, примененный в этой задаче, не может охватить и зону поглощения лазерного излучения порядка 100 нм, и весь радиус капли 50 мкм. Отношение размеров 500, если положить даже 10 SPH частиц на зону поглощения, то число частиц превышает десятки миллиардов.

Это неподъемный объем даже для нашего SPH кода, производительность которого увеличена на много порядков по сравнению с обычными (до 10^5 частиц) однопроцессорными версиями за счет применения алгоритма с глубоким распараллеливанием и автобалансировкой между вычислительными узлами, см. описание в работе [15] в списке литературы к п. 1.4. Обычная загрузка для нашей многопроцессорной версии составляет десятки миллионов частиц.

Поэтому был применен гибридный подход, при котором абсорбция в зоне поглощения, формирование волны сжатия и распространение ее в толщу капли рассчитывалось отдельно. А затем полученное поле гидродинамических переменных переносилось в SPH код.

Другой пример эффективного гибридного подхода описан в работах [10] в списке литературы к п. 1.4. Была создана физическая модель, которая позволила нам использовать комбинацию из лагранжевой двухтемпературной гидродинамической программы (1) и МД-МК (молекулярная динамика и Монте-Карло) программы (2) для решения проблемы лазерного блистеринга тонкопленочных покрытий. В результате была решена практически весьма значимая задача о лазерном формировании метаповерхностей (см. [1] в п. 1.4) за счет создания массивов микро- нанокуполов.

Аналогичные приемы будут применены при решении заявленных выше проблем А-Е).

3) Характеристики кремния, облученного лазером

См. форму 4

И) Новые подходы к расчетам коэффициента электрон-ионного взаимодействия в металлах

См. форму 4

Литература к п. 1.5

[1] *Предыдущие работы коллектива по рентгеновским источникам*

A.Ya. Faenov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, V.A. Khokhlov, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, T. Nakamura, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, Low-threshold ablation of dielectrics irradiated by picosecond soft x-ray laser pulses, *Appl. Phys. Lett.* V. 94, 231107 (2009);

N.A. Inogamov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovskii, Yu.V. Petrov, I.Yu. Skobelev, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Spallative Ablation of Metals and Dielectrics, *Contrib. Plasma Phys.*, V. 49(7-8), 455-466 (2009);

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, A.Y. Faenov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, I.Y. Skobelev, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, Y.V. Petrov, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Spallative ablation of dielectrics by x-ray laser, *Appl. Phys. A* V. 101(1), 87-96 (2010); arXiv:0912.3184 [physics.optics];

M. Ishino, A.Ya. Faenov, M. Tanaka, N. Hasegawa, M. Nishikino, S. Tamotsu, T.A. Pikuz, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, I.Yu. Skobelev, V.E. Fortov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, T. Ohba, T. Kaihori, Y. Ochi, T. Imazono, T. Kawachi, Nanoscale surface modifications and formation of conical structures at aluminum surface induced by single shot exposure of soft x-ray laser pulse, *J. Appl. Phys.*, V. 109, 013504 (2011) [6 pages];

N.A. Inogamov, A.Ya. Faenov, V.V. Zhakhovskii, I.Yu. Skobelev, V.A. Khokhlov, Y. Kato, M. Tanaka, T.A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S.V. Bulanov, T. Kawachi, Yu.V. Petrov, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Interaction of short laser pulses in wavelength range from infrared to x-ray with metals, semiconductors, and dielectrics, *Contrib. Plasma Phys.*, V. 51, No. 4, 361 – 366 (2011);

Y. Cherednikov, N.A. Inogamov, H.M. Urbassek, Atomistic modeling of ultrashort-pulse ultraviolet laser ablation of a thin LiF film, *J. Opt. Soc. Am. B*, V. 28(No. 8) 1817-1824 (2011);

N.A. Inogamov, A.Ya. Faenov, V.V. Zhakhovsky, T.A. Pikuz, I.Yu. Skobelev, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Shepelev, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, Y. Fukuda, M. Kando, T. Kawachi, M. Nagasono, H. Ohashi, M. Yabashi, K. Tono, Y. Senda, T. Togashi, and T. Ishikawa, Two-Temperature Warm Dense Matter Produced by Ultrashort Extreme Vacuum Ultraviolet-Free Electron Laser (EUV-FEL) Pulse, *Contrib. Plasma Phys.*, V. 51, No. 5, 419 – 426 (2011);

Н.А. Иногамов, С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, А.Ю. Фаенов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, В.Е. Фортов, И.Ю. Скобелев, Ю. Като, Т.А. Пикуз, В.В. Шепелев, Ю. Фукуда, М. Танака, М. Кишимото, М. Ишино, М. Нишикино, М. Кандо, Т. Кавачи, М. Нагасоно, Н. Охаша, М. Ябаша, К. Тано, Ю. Сенда, Т. Тогаши, Т. Ишикава, Абляция диэлектриков под действием коротких импульсов рентгеновских плазменных лазеров и лазеров на свободных электронах, *Оптический Журнал* т. 78, вып. 8, 5-15 (2011) [N. A.; Inogamov, S. I.; Anisimov,

Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovskii, A.Ya. Faenov, T.A. Pikuz, V.E. Fortov, I.Yu. Skobelev, Y. Kato, V.V. Shepelev, Y. Fukuda, M. Tanaka, M. Ishino, M. Nishikino, M. Kando, T. Kawachi, M. Kishimoto, M. Nagasono, K. Tano, T. Ishikawa, N. Ohashi, M. Yabashi, T. Togashi, Y. Senda, Ablation of insulators under the action of short pulses of X-ray plasma lasers and free-electron lasers, *J. Opt. Technol.*, 2011, 78, 473-480];

N.A. Inogamov, S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovsky, A.Ya. Faenov, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.E. Fortov, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, P.S. Komarov, I.Yu. Skobelev, Y. Kato, T.A. Pikuz, V.V. Shepelev, Y. Fukuda, M. Tanaka, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, M. Kando, T. Kawachi, M. Nagasono, H. Ohashi, M. Yabashi, K. Tono, Y. Senda, T. Togashi, T. Ishikawa, Ablation by short optical and X-ray laser pulses, *Proc. SPIE*, V. 7996, 79960T (2011);

Ya. Cherednikov, N.A. Inogamov, and H.M. Urbassek, Influence of defects on extreme ultraviolet laser ablation of LiF, *Phys. Rev. B* V. 88, 134109 (2013);

M. Ishino, A. Faenov, M. Tanaka, S. Tamotsu, T. Pikuz, N. Hasegawa, M. Nishikino, N. Inogamov, I. Skobelev, V. Fortov, G. Norman, S. Starikov, V. Stegailov, T. Kaihori, T. Kawachi, and M. Yamagiwa, Nano-meter scale modifications on material surfaces induced by soft x-ray laser pulse irradiations, *X-Ray Lasers and Coherent X-Ray Sources: Development and Applications X*, edited by Annie Klisnick, Carmen S. Menoni, *Proc. of SPIE Vol. 8849*, 88490F (2013);

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, S.I. Ashitkov, Yu.N. Emirov, K.V. Khichshenko, A.Ya. Faenov, T.A. Pikuz, M. Ishino, M. Kando, N. Hasegawa, M. Nishikino, P.S. Komarov, B.J. Demaske, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, T. Kawachi, I.I. Oleynik, Ultrafast lasers and solids in highly excited states: results of hydrodynamics and molecular dynamics simulations, *J. Phys.: Conf. Ser.* v. 510, 012041 (2014);

M. Ishino, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, I. Skobelev, A. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, and M. Yamagiwa, Very low electron temperature in warm dense matter formed by focused picosecond soft x-ray laser pulses, *J. Appl. Phys.* V. 116, 183302 (2014). doi: 10.1063/1.4901943;

Inogamov, N.A., Zhakhovsky, V.V., Ashitkov, S.I., Emirov, Yu.N., Faenov, A.Ya., Petrov, Yu.V., Khokhlov, V.A., Ishino, M., Demaske, B.J., Tanaka, M., Hasegawa, N., Nishikino, M., Tamotsu, S., Pikuz, T.A., Skobelev, I.Y., Ohba, T., Kaihori, T., Ochi, Y., Imazono, T., Fukuda, Y., Kando, M., Kato, Y., Kawachi, T., Anisimov, S.I., Agranat, M.B., Oleynik, I.I., Fortov, V.E., Surface nanodeformations caused by ultrashort laser pulse, *Engineering Failure Analysis*, V. 47, 328-337 (2015);

Y. Rosandi, F.C. Kabeer, Y. Cherednikov, E.S. Zijlstra, M.E. Garcia, N.A. Inogamov, and H.M. Urbassek, Melting of Al Induced by Laser Excitation of 2p Holes, *Mater. Res. Lett.* V. 3(3), 149-155 (2015);

N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Yamagiwa, M. Ishino, M.B. Agranat, S.I. Ashitkov, A.Ya. Faenov, V.A. Khokhlov, D.K. Ilnitsky, Yu.V. Petrov, K.P. Migdal,

T.A. Pikuz, S. Takayoshi, T. Eyama, N. Kakimoto, T. Tomita, M. Baba, Y. Minami, T. Suemoto, and T. Kawachi, Hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse: simulations and the optical pump--X-ray probe experiment, Appl. Phys. B V. 119, 413-419 (2015).

N. Hasegawa, M. Nishikino, M. Ishino, N. Ohnishi, A. M. Ito, Y. Minami, M. Baba, A.Y. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, K. Kondo, and T. Suemoto, The Observation of Transient Thin Film Structures During the Femto-Second Laser Ablation Process by Using the Soft X-Ray Laser Probe, X-Ray Lasers 2016, Proceedings of the 15th International Conference on X-Ray Lasers, Editors: Kawachi, T., Bulanov, S.V., Daido, H., Kato, Y. (Eds.);

M. Ishino, N. Hasegawa, M. Nishikino, T. Pikuz, I. Skobelev, A. Faenov, N. Inogamov, T. Kawachi, M. Yamagiwa, "Low electron temperature in ablating materials formed by picosecond soft x-ray laser pulses," Proc. SPIE 9589, X-Ray Lasers and Coherent X-Ray Sources: Development and Applications XI, 958904 (September 22, 2015); doi:10.1117/12.2186053;

Masahiko Ishino, Nail A. Inogamov, Satoshi Tamotsu, Vasily V. Zhakhovsky, Noboru Hasegawa, Igor Yu. Skobelev, Anatoly Ya. Faenov, Tatiana A. Pikuz, Katsuhiro Mikami, Tetsuya Kawachi, Masaharu Nishikino, Study of damage structure formation on aluminum film targets by picosecond soft X-ray laser ablation around threshold region, Applied Physics A 124:649 (8 pages) (2018) <https://doi.org/10.1007/s00339-018-2072-9>;

N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky and Yu.V. Petrov, Energy redistribution between layers in multi-layered target heated by x-ray pulse, Journal of Physics: Conf. Series V. 946, 012009 (2018) doi :10.1088/1742-6596/946/1/012009

[2] *Предыдущие работы коллектива по физике двухтемпературных явлений (несколько избранных работ за последние годы)*

N.A. Inogamov, Yu.V. Petrov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, B.J. Demaske, S.I. Ashitkov, K.V. Khishchenko, K.P. Migdal, M.B. Agranat, S.I. Anisimov, V.E. Fortov, I.I. Oleynik, Two-temperature thermodynamic and kinetic properties of transition metals irradiated by femtosecond lasers, Intern. Symp. High Power Laser Ablation 2012; AIP Conf. Proc. Vol. 1464, 593-608 (2012); doi: 10.1063/1.4739912;

Ю.В. Петров, Н.А. Иногамов, К.П. Мигдал, Теплопроводность и коэффициент электрон-ионного теплообмена в конденсированных средах с сильновозбужденной электронной подсистемой, Письма ЖЭТФ Т. 97, 24-31 (2013) [Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, K.P. Migdal, Thermal Conductivity and the Electron-Ion Heat Transfer Coefficient in Condensed Media with a Strongly Excited Electron Subsystem, JETP Lett., 2013, 97, 20-27];

Ю.В. Петров, Н.А. Иногамов, Снятие моттовского межзонного s-d увеличения электросопротивления никеля и платины за счет возбуждения электронов фемтосекундным лазерным импульсом, Письма ЖЭТФ Т. 98, 316-322 (2013) [Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, Elimination of the Mott Interband s-d Enhancement of the Electrical Resistance

of Nickel and Platinum Owing to the Excitation of Electrons by Femtosecond, Laser Pulses JETP Letters, 2013, 98, 278–284];

K.P. Migdal, Yu.V. Petrov, and N.A. Inogamov, Kinetic coefficients for d-band metals in two-temperature states created by femtosecond laser irradiation, Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013, edited by Vadim P. Veiko, Tigran A. Vartanyan, Proc. of SPIE Vol. 9065, 906503, © 2013 SPIE · CCC code: 0277-786X/13/\$18 · doi: 10.1117/12.2053172;

D.K. Ilnitsky, V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, K.V. Khishchenko, K.P. Migdal, and S.I. Anisimov, Two-temperature hydrodynamics of laser-generated ultrashort shock waves in elasto-plastic solids, J. Phys.: Conf. Ser. v. 500, 032021 (2014);

Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, Two-temperature equation of state for aluminum and gold with electrons excited by an ultrashort laser pulse, Appl. Phys. B V. 119, 401–411 (2015);

Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, and K.P. Migdal, Two-temperature Heat Conductivity of Gold, PIERS Proceed. (ISSN 1559-9450), Prague, Czech Republic, July 6-9, 2015, pp. 2431-2435 (2015);

K.P. Migdal, D.K. Il'nitsky, Yu.V. Petrov, and N.A. Inogamov, Equations of state, energy transport and two-temperature hydrodynamic simulations for femtosecond laser irradiated copper and gold, J. Phys.: Conf. Series V. 653, 012086 (2015). doi:10.1088/1742-6596/653/1/012086;

Yu. V. Petrov, N. A. Inogamov, S. I. Anisimov, K. P. Migdal, V. A. Khokhlov, and K. V. Khishchenko, Thermal conductivity of condensed gold in states with the strongly excited electron subsystem, J. Phys.: Conf. Series V. 653, 012087 (2015). doi:10.1088/1742-6596/653/1/012087;

K.P. Migdal, Yu.V. Petrov, D.K. Il'nitsky, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, K.V. Khishchenko, D.V. Knyazev, P.R. Levashov, Heat conductivity of copper in two-temperature state, Appl. Phys. A V. 122, 408 (5 pages) (2016). DOI 10.1007/s00339-016-9757-8;

Ю.В. Петров, К.П. Мигдал, Н.А. Иногамов, С.И. Анисимов, "Процессы переноса в металле с горячими электронами, возбужденными лазерным импульсом" Письма ЖЭТФ т. 104, вып. 6, стр. 446-454 (2016) [Yu.V. Petrov, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, S.I. Anisimov, Transport Processes in a Metal with Hot Electrons Excited by a Laser Pulse, JETP Lett., 2016, 104, 431-439];

Petrov Y.V., Mokshin A.V., Galimzyanov B.N., Inogamov N.A. Electrical resistivity and thermal conductivity of liquid aluminum in the two-temperature state IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series V. 946, 012096 (2018) doi :10.1088/1742-6596/946/1/012096

[3] <https://www.usasymposium.com/hpla/agenda.php> Simulations of Damage of Ru Thin Films Induced by Single-Shot fs EUV FEL Pulses, Mr. Igor Milov, MESA+ Institute for Nanotechnology, University of Twente;

V.A. Khokhlov, I. Milov, I.A. Makhotkin, V.V. Zhakhovsky, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, V.V. Shepelev, Y.V. Petrov, and N.A. Inogamov, Dynamics of ruthenium mirror under action of soft x-ray or optical ultrashort laser pulse, Journal of Physics: Conf. Series, accepted

[4] H. Mindt, M. Megahed, N. Lavery, M. Holmes, S. Brown, Powder Bed Layer Characteristics: The Overseen First-Order Process Input, Metallurgical & Materials Transactions. Part A, V. 47, Issue 8, 3811-3822 (2016)

[5] Christoph Meier, Reimar Weissbach, Johannes Weinberg, Wolfgang A. Wall, A. John Hart, Modeling and Characterization of Cohesion in Fine Metal Powders with a Focus on Additive Manufacturing Process Simulations, arXiv:1804.06816v3 [cs.CE] 25 May 2018