

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Хохлова Виктора Александровича
**«Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких
лазерных импульсов на твердые мишени»**,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Диссертационная работа В.А. Хохлова посвящена построению теоретической модели гидродинамики и исследованию течений в металлах и диэлектриках, проходящих через особое, двухтемпературное (2Т) состояние, когда температура электронной подсистемы заметно превышает фононную температуру атомной подсистемы. Несмотря на краткость существования таких состояний, их эволюция после воздействия ультракороткого лазерного импульса определяет всю последующую динамику и фазовые превращения вещества.

Актуальность темы диссертации

Воздействие ультракоротких лазерных импульсов (УКЛИ) фемтопикосекундного длительности на твердые материалы различной природы и строения широко используется в исследованиях параметров их сверхбыстрой релаксационной динамики и характеризуется более высокой удельной эффективностью их обработки. При этом используется малая длительность УКЛИ, как правило лежащая в диапазоне между характерными временами электрон-электронной и ион-ионной (фононной) тепловой релаксации с одной стороны и электрон-ионной с другой. Несмотря на большой объем накопленных экспериментальных фактов, их теоретический анализ и осмысление пока явно недостаточны. В первую очередь, это относится к гидродинамическим явлениям релаксационной динамики материалов после воздействия УКЛИ, поэтому детальный теоретический анализ таких явлений

на основе модели двухтемпературной (2Т) гидродинамики в диссертационной работе В.А. Хохлова имеет несомненную актуальность.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа Хохлова В.А. состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 220 страниц. Библиографический список цитируемой литературы содержит 184 наименования.

Диссертационное исследование хорошо структурировано, изложено четко и понятно, хотя местами излишне кратко.

Во введении обоснована актуальность и новизна темы, сформулирована цель работы. Приводится обзор хорошо установленных физических фактов, лежащих в основе 2Т-гидродинамики (67 ссылок).

В первой главе построена согласованная теоретическая модель и соответствующая система уравнений 2Т-гидродинамики (2Т-ГД) для конденсированного вещества. Проанализированы основные приближения, лежащие в основе модели. Подробно обсуждаются применяемые уравнения состояния, их электронная часть, температурные зависимости коэффициентов теплопроводности и электрон-ионного теплообмена. На основе сформулированной модели рассмотрено формирование прогретой зоны вблизи облучаемой поверхности в полубесконечной металлической мишени.

Проанализировано, почему обычно используемые критерии разрыва оказываются неприменимыми на пикосекундных временах, и предложена форма критерия разрыва, дающего в гидродинамическом расчете полное соответствие основных характеристик процесса – порога отрыва, момента и глубины отрыва – результатам молекулярно-динамического моделирования и экспериментов.

С использованием численного моделирования рассмотрено движение вещества мишени после воздействия УКЛИ, особенности абляции,

возникновение интерференционных колец на микрофотографиях облученной поверхности с помощью зондирующих импульсов.

Во второй главе модель обобщается на случай диэлектрика, для чего рассмотренная в первой главе 2Т-ГД модель дополнена кинетическим уравнением для плотности электронов, возбужденных лазерным импульсом из валентной зоны в зону проводимости, и зависимостью от этой плотности электронных свойств материала. На примере LiF под действием жесткого ультрафиолетового излучения анализируется возникновение волн сжатия и разряжения, а также откольная абляция материала.

В третьей главе показывается влияние упругих свойств кристаллического металла на прохождение ударных волн через его мишень конечной толщины (пленку). Для этого теоретическая модель дополнена учетом сдвиговых упругих напряжений (девиаторов), которые препятствуют изменению формы твердого тела. Показывается, что учет девиаторов напряжений, даже без учета пластичности, позволяет устранить отличие результатов расчетов для гидродинамической модели от результатов экспериментов. Это свидетельствует о высоком уровне сдвиговых упругих напряжений в металле на малых временах после облучения, что связано с конечной скоростью пластической релаксации.

В четвертой главе теоретическая модель обобщена и применена для случая слоистых мишеней (системы пленка-подложка и многослойные мишени). Проанализированы особенности использования лагранжевого подхода при наличии слоев веществ с существенно разными свойствами: металлической пленки на диэлектрической подложке, ламината из тонких слоев различных металлов. Подробно исследованы вопросы отслоения пленок и разрушения в многослойных мишенях под действием УКЛИ.

В пятой главе на основе развитой 2Т-ГД модели исследована структура границы «твердое золото-вода» как пример процесса абляции УКЛИ в жидкость. Подробно проанализированы условия в расширяющемся

металле, нагретом УКЛИ. Проведены теоретические оценки развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и конденсации испаренного золота в воде как основных механизмов формирования наночастиц при таком процессе.

В заключении представлены основные результаты проведенных исследований. Содержание работы в полной мере отражает достижение поставленных целей и задач.

Основные результаты диссертации и их научная новизна

Основным научным результатом диссертации является развитие методов теоретического описания на основе модели двухтемпературной гидродинамики начальной стадии тепловых и механических процессов в твердой мишени при воздействии ультракороткого (фемто-пикосекундного) лазерного импульса. Разработанная физическая модель и на ее основе расчетная схема 2Т-гидродинамики (2ТГД) позволила последовательно корректно описать 2Т эффекты в конденсированном веществе мишеней. Научной новизной обладают конкретные результаты по лазерной абляции, распространению ударных волн, образованию наночастиц в системе металл-жидкость. Важно, что разработанные модели задают начальные условия для других методов анализа, таких как классическая однотемпературная молекулярная динамика (МД), неприменимая на ранних стадиях облучения.

В частности, МД-моделирование, стартующее с состояния, полученного в 2Т-ГД расчете, или сам 2Т-ГД расчет с использованием впервые предложенного варианта критерия разрыва дают правильное описание процесса откольной абляции. Получаемые порог абляции, момент отрыва, толщина отрывающегося слоя и его скорость точно соответствуют экспериментальным результатам. При учете гауссовского радиального распределения интенсивности лазерного излучения от центра к периферии лазерного пятна отлетающий слой имеет вид полупрозрачного купола, опирающегося на практически плоское основание, что соответствует схеме в опытах Ньютона (с перевернутой линзой). Это позволило корректно объяснить наблюдающиеся в пространственно-временной динамике лазерной

абляции интерференционные кольца Ньютона в микрофотографиях отраженного задержанного зондирующего импульса УКЛИ.

Разработанная модель с включением сдвиговой упругости позволила получить результаты, полностью соответствующие результатам МД-моделирования и данным экспериментов. В том числе показано, что вещество в короткой треугольной ударной волне (УВ) остается упругим (скорость УВ соответствует упругому веществу), несмотря на значительное превышение классического порога упругости.

Разработанное расширение 2Т-ГД модели и расчетной схемы позволило впервые описать воздействие УКЛИ на мишени, состоящие из двух (пленка на подложке) и более (наноламинаты) слоев веществ с существенно различными свойствами. Полученные результаты хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Проведено исследование параметров процесса лазерной абляции в жидкость (на примере системы «золото-вода») в широком диапазоне длительностей лазерных импульсов от фемто- до наносекундного диапазона. Исследовано образование наночастиц золота в воде в результате развития неустойчивости Рэлея-Тейлора на границе воды и оторвавшегося слоя золота, возникающей вследствие торможения контакта водой (в случае коротких лазерных импульсов) и при конденсации паров золота, проникающих в воду при контакте сверхкритических воды и золота (для длинных импульсов).

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе В.А. Хохлова, обеспечивается обоснованным применением методов теоретической физики, подробным анализом условий и границ применимости используемых приближений, а также демонстрацией перехода разработанной модели в однотемпературное приближение в предельном случае длинного лазерного импульса. Следует отметить, что полученные результаты тщательно сравниваются с экспериментальными данными. Большое количество статей по диссертации написано совместно с экспериментаторами, и посвящено анализу и интерпретации

экспериментальных наблюдений. Поэтому можно заметить, что теоретические модели диссертации развивались в тесном взаимодействии с экспериментальными работами по ультракороткому лазерному облучению.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 работах, индексируемых Web of Science: Core Collection, и/или Scopus, в том числе в 7 российских журналах, 9 международных журналах Q1, Q2 и 19 индексируемых Web of Science: Core Collection рецензируемых журналах по материалам конференций и в 7 статьях в сборниках конференций.

Замечания

1. Защищаемые положения диссертационной работы сформулированы неудачно – они должны носить характер утверждений, подтверждаемых результатами работы.

2. Начальная часть взаимодействия УКЛИ с металлами рассмотрена в 2Т-ГД модели без учета конкретного влияния неравновесной и термализованной динамики электронов на их оптические свойства, а также процессов электронной и электронно-ионной эмиссии, фото- и ударного возбуждения наряду с оже-рекомбинацией d-электронов в металлах. Хотя в предложенной 2Т-ГД модели используется относительная шкала поглощенной плотности энергии УКЛИ, в значительной степени учитывающая динамические изменения оптических свойств, и гидродинамические процессы реализуются на больших временах по сравнению с длительностью УКЛИ, представляется актуальной оценка влияния оптических и эмиссионных эффектов, а также межзонной динамики носителей на 2Т-стадию рассматриваемых явлений.

3. При анализе взаимодействия УКЛИ с диэлектриками представляется целесообразным рассматривать не только электроны, а электрон-дырочную плазму в целом, ее амбиполярную диффузию, дополнительную сверхбыструю плазменную генерацию нетепловых

напряжений (посредством акустического потенциала деформации; актуально также для фотовозбуждения УКЛИ d-электронов в металлах).

4. При (суб)наносекундной лазерной абляции в жидкостях возможны режимы оптического пробоя жидкости и/или абляционного факела, которые стоит дифференцировать от режимов, рассматриваемых в работе.

5. В работе встречаются орфографические и пунктуационные опечатки, не влияющие, впрочем, на восприятие текста.

Перечисленные вопросы и замечания носят уточняющий характер, не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы В.А. Хохлова и не влияют на общую высокую оценку диссертации как законченной и актуальной научно-квалификационной работы, имеющей научную новизну и практическую значимость.

Общая оценка диссертационной работы

Рассматриваемая диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области теоретической физики, а именно теоретическое описание начальных стадий воздействия ультракоротких импульсов лазерного излучения на твердые мишени на основе двухтемпературной гидродинамики. Полученные в диссертационной работе результаты обладают научной новизной и вносят вклад в развитие теоретической физики в части изучения экстремальных состояний конденсированного вещества и физических явлений в нем, включая кинетику фазовых переходов при воздействии мощного короткоимпульсного лазерного излучения, как примера сильно неравновесной системы.

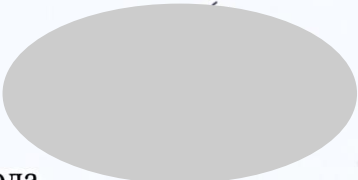
Материал в диссертационной работе В.А. Хохлова изложен ясно, результаты представлены четко, иллюстрированы информативными рисунками. Автореферат очень подробно и в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Хохлова В.А. «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени» отвечает всем требованиям ВАК РФ к докторским диссертациям, в частности – требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. N 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Хохлов Виктор Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Официальный оппонент:

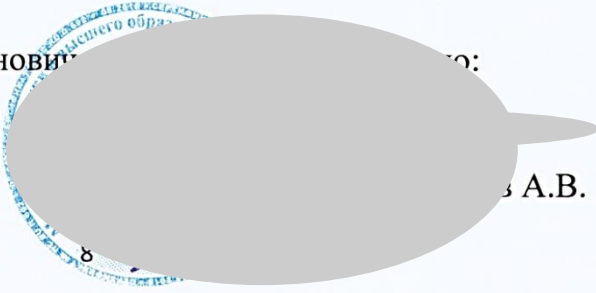
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией лазерной нанопластики и биомедицины Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

 Кудряшов Сергей Иванович

«11» марта 2025 года

Контактные данные: тел.: +7(499) 132-60-83, e-mail: sikudr@lebedev.ru

Адрес места работы: ГСП-1, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53

Подпись сотрудника Сергея Ивановича: 

Ученый секретарь ФИАН

А.В.