

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 активно исследуемому разделу физики неравновесных быстропротекающих процессов, а именно, построению теоретической модели гидродинамики и исследованию течений в веществе в особом двухтемпературном (2Т) состоянии, когда температура электронной подсистемы превышает фононную температуру атомной подсистемы. Несмотря на мизерное время существования таких состояний, их эволюция после воздействия ультракороткого лазерного импульса определяет всю последующую динамику и фазовые превращения вещества. Созданная теоретическая модель и соответствующие численные алгоритмы таковы, что позволяют гладким сквозным образом отслеживать протекающие процессы на двухтемпературной стадии ($T_e \gg T_i$), на переходной стадии ($T_e > T_i$) и далее на однотемпературной ($T_e \sim T_i$) стадии.

Актуальность темы диссертации

Воздействие лазерного излучения на твердое вещество широко используется как в исследованиях свойств конденсированных веществ, так и в технологиях их обработки. При этом в ряде случаев использование ультракоротких лазерных импульсов (УКЛИ) фемто- пикосекундного диапазона длительностей, активно развивающееся в последнее время, имеет ряд преимуществ. Характерной особенностью таких импульсов является то, что их диапазон расположен между характерными временами электрон-

электронной и ион-ионной (фононной) тепловой релаксации с одной стороны и электрон-ионной с другой.

Экспериментальное исследование столь быстропротекающих процессов крайне затруднено вследствие необходимости использования, а зачастую и создания, уникального дорогостоящего оборудования. Проведение экспериментальных работ при исследовании физических процессов, происходящих в течение временного промежутка не более $10^{-11} - 10^{-12}$ с, это крайне сложная и дорогостоящая проблема. Поэтому любые теоретические исследования, облегчающие понимание этих явлений, приветствуются не только теоретиками, но и экспериментаторами, так как значительно повышают экономическую эффективность получения новых фундаментальных результатов.

Рассматриваемые явления требуют развития теоретических моделей воздействия таких импульсов на металлы и диэлектрики. Детальному теоретическому анализу этих эффектов на основе модели двухтемпературной (2Т) гидродинамики посвящена диссертационная работа Хохлова В.А., что определяет ее несомненную актуальность. Дополнительную ценность этой работы добавляет факт тесной взаимосвязи теоретических исследований Хохлова В.А., с работой экспериментаторов, что не только позволило ускорить получение новых фундаментальных знаний, но и существенным образом удешевить этот процесс.

Структура и содержание работы.

Диссертационная работа Хохлова В.А. состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 220 страниц, в том числе, 113 рисунков. 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 обзорный анализ хорошо установленных физических явлений, лежащих в основе 2Т гидродинамики (67 ссылок).

В первой главе построена теоретическая модель и соответствующая система уравнений 2Т гидродинамики (2ТГД) для конденсированного вещества. Проанализированы основные приближения, лежащие в основе модели. Подробно обсуждены применяемые уравнения состояния, их электронная часть, коэффициенты теплопроводности и электрон-ионного теплообмена. На основе сформулированной модели проанализировано формирование прогретой зоны вблизи облучаемой поверхности 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 - молекулярно-динамическому моделированию и результатам экспериментов.

С использованием численного моделирования рассмотрено движение вещества мишени после воздействия УКЛИ, особенности абляции, возникновение «колец Ньютона» на микрофотографиях облученной поверхности с помощью зондирующих импульсов.

Во второй главе модель обобщается на случай диэлектрика, для чего рассмотренная в первой главе 2ТГД дополнена учетом динамики плотности числа электронов, возбужденных лазерным импульсом из валентной зоны в зону проводимости, (степени ионизации) и зависимостью от этой плотности электронных свойств. На примере монокристалла LiF, находящегося под воздействием интенсивного жесткого ультрафиолетового или рентгеновского излучения, анализируется возникновение волн сжатия и разряжения, а также откольная абляция материала.

В третьей главе рассмотрено влияние упругих свойств металла на прохождение ударных волн через мишень конечной толщины (пленку). Для этого теоретическая модель дополнена учетом упругих напряжений (девиаторов), которые препятствуют изменению формы твердого тела. Показывается, что учет девиаторов напряжений, даже без учета пластичности, позволяет устранить отличие расчетов по чисто гидродинамической модели от эксперимента. 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 рентгеновских зеркал с отражающим слоем из металлической пленки на диэлектрической подложке («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.

В пятой главе на основе развитой теоретической модели двухтемпературной гидродинамики исследована система золото-вода как пример системы процесса лазерной абляции металла в жидкость. Исследована абляция золота, подверженного воздействию УКЛИ в водной среде. Подробно проанализированы условия в расширяющемся металле, нагретом лазерным излучением. Проведены теоретические оценки развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и конденсации испаренного золота в воде как основные механизмы 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 начальной стадии тепловых и механических процессов в твердой мишени при воздействии ультракороткого (фемтопикосекундного) лазерного импульса на основе двухтемпературной гидродинамики. 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. Важным результатом является тот факт, что разработанные модели задают начальные условия для других методов анализа, таких как классическая однотемпературная молекулярная динамика, неприменимая на ранних стадиях облучения.

Молекулярно-динамическое (МД) моделирование, стартующее с состояния, полученного в 2ТГД расчете, или 2ТГД расчет с использованием впервые предложенного варианта критерия разрыва дает описание процесса откольной абляции, полностью соответствующее результатам эксперимента. Получаемые порог абляции, момент отрыва, толщина отрывающегося слоя и его скорость точно соответствуют экспериментальным результатам. При учете радиального распределения интенсивности лазерного излучения - падения интенсивности 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 последовательно корректно объяснить наблюдающиеся при лазерной абляции «кольца Ньютона» в микрофотографиях отраженного зондирующего импульса.

Впервые разработана 2Т-модель, которая учитывает упругие свойства твердой фазы. Модуль сдвига G в этой модели остается конечным в твердой

фазе и обращается в нуль при переходе через фронт в жидкую фазу. Включение сдвиговой упругости позволило получить результаты, полностью соответствующие МД-моделированию и экспериментам. В том числе показано, что вещество в короткой треугольной ударной волне (УВ) остается упругим (скорость УВ соответствует упругому веществу) несмотря на значительное превышение порога упругости, принимаемого в справочниках. Дело в том, что упруго-пластический переход, приводимый в справочниках, относится к ситуациям с темпами деформации, происходящими в стационарных условиях. При быстропротекающих процессах многие, казалось бы, неизменные константы имеют значения, существенно отличающиеся от справочных.

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

Впервые проведено исследование лазерной абляции в жидкость (на примере абляции золота в воду) 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 золота, продиффундировавшего в воду при контакте сверхкритических состояний воды и золота (при длинных импульсах).

Разработанное расширение модели и расчетной схемы позволило впервые описать воздействие ультракоротких лазерных импульсов на мишени, состоящие из двух (пленка на подложке) и более (наноламинаты)

слоев веществ с существенно различными свойствами. Полученные результаты хорошо соответствуют экспериментальным данным.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе Хохлова В.А., обеспечивается обоснованным применением методов теоретической физики, подробным анализом условий и границ применимости используемых приближений, а также переходом разработанной модели в однотемпературное приближение в предельном случае длинного лазерного импульса. Следует отметить, что полученные результаты тщательно сравниваются с экспериментальными данными. Большое количество статей, использованных в диссертации, написано совместно с экспериментаторами и посвящено анализу и интерпретации полученных экспериментальных данных. Поэтому можно заключить, что теоретические модели диссертации развивались в плотном взаимодействии с экспериментальными работами по ультракороткому лазерному воздействию.

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.

Вопросы и замечания

В тексте следовало бы более подробно остановиться на экспериментальных данных, с которыми проводилось сравнение, чтобы можно было судить о степени соответствия расчетов и экспериментов, например по порогам абляции в главе 4. Чаще всего просто указано, что соответствие есть, но без конкретных чисел.

Почему в качестве критерия двухтемпературности используется время импульса, а не мощность энерговыделения? Ведь разница температур

электронной и ионной подсистем возникает из-за ограниченной мощности теплообмена между подсистемами.

Есть замечания по оформлению диссертации и автореферата.

В списке литературы не указаны все авторы статей. После фамилий трех авторов используется «и др.». Это снижает информационную ценность списка. В этом списке большая часть ссылок принадлежит соавторам, в ущерб остальным ученым.

Объем автореферата несколько завышен – 54 с., в основном, из-за избыточного, на мой взгляд, цитирования источников – 84 ссылки.

В списке публикаций автора присутствуют публикации в трудах конференций, что недавно было ВАКом запрещено. Впрочем, и без них количество статей диссертанта превышает заданный показатель.

Перечисленные вопросы и замечания носят уточняющий характер, не снижают общего крайне положительного впечатления от диссертационной работы Хохлова В.А., являющегося достойным учеником Анисимова С.И., 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 неравновесных быстропротекающих

Сведения об официальном оппоненте
Рогалин Владимир Ефимович,

Доктор физико-математических наук, по специальности 01.04.07 – физика
конденсированного состояния,

Заведующий лабораторией плазменно-лазерных технологий Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики и
электроэнергетики Российской академии наук.

191186, Дворцовая набережная, дом 18, Санкт-Петербург, РФ.

Эл. почта v-rogalin@mail.ru, Телефон: +7 (812) 315-17-57.