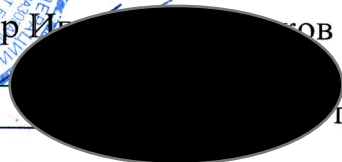


УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Челябинский
государственный университет»,
кандидат химических наук,
доцент
Александр Игоров



«27»



г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Челябинский государственный университет»
о диссертационной работе Хохлова Виктора Александровича
«Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких
лазерных импульсов на твердые мишени»,
представленной на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности 1.3.3. Теоретическая физика.

Диссертационная работа Хохлова В.А. посвящена разработке теоретических моделей двухтемпературной гидродинамики при накачке электронной подсистемы металла или диэлектрика энергией лазерного излучения на временах, меньших времени электрон-ионной релаксации, а также применению разработанных моделей для анализа воздействия ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени.

Актуальность темы диссертации

Развитие лазерных технологий и их применение для исследования свойств конденсированных веществ, для их обработки и наноструктурирования требует развития теоретических моделей взаимодействия лазерного излучения с металлами и диэлектриками. Особым случаем является воздействие относительно нового класса ультракоротких (субпикосекундных) мощных лазерных импульсов, для которых на ранних стадиях существенными являются двухтемпературные эффекты, обусловленные конечной скоростью установления термодинамического

равновесия между электронной подсистемой кристалла, которая поглощает лазерное излучение, и ионной подсистемой, обладающей много большей теплоемкостью и меньшей теплопроводностью. На детальный теоретический анализ этих эффектов на основе подхода двухтемпературной гидродинамики и направлены исследования в рамках диссертационной работы Хохлова В.А., что определяет их безусловную **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.

Введение сразу дает основное представление об актуальности, основных идеях, новизне и структуре работы, что существенно облегчает работу с текстом. Также сформулированы цель и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы и личный вклад автора.

В первой главе сформулированы основные приближения и следующие из них уравнения теоретической модели двухтемпературной гидродинамики. В отличие от более ранних моделей учтено электронное давление и его влияние на динамику облучаемого вещества. 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. Рассматриваются особенности абляции вещества под действием ультракоротких импульсов облучения.

Во второй главе модель обобщается на случай диэлектрика, для чего учитывается насыщение его валентной зоны электронами под действием лазерного облучения. На примере LiF под действием жесткого ультрафиолетового или рентгеновского излучения анализируется

возникновение волн сжатия и разряжения, а также откольная абляция материала.

В третьей главе показывается 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 слоистых мишеней (системы пленка-подложка и многослойные мишени). 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 для процесса лазерной абляции в жидкость. 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 на основе двухтемпературной гидродинамики начальной стадии тепловых и механических процессов в твердой мишени при воздействии ультрокороткого (субпикосекундного) лазерного импульса. При разработке моделей проанализированы и учтены основные физические процессы, которые во многом отличаются от случая

лазерных импульсов большей длительности. 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, неприменимая на ранних стадиях облучения.

Большое внимание в диссертационной работе уделено интересным эффектам, возникающим при комбинации факторов и описываемым разработанными теоретическими моделями. Так, в главе 1 рассматривается образование пузыря аблированного материала над плоским дном кратера, приводящего к регистрируемой интерференционной картине в виде колец Ньютона. В главе 4 для многослойной мишени рассматривается эффект «обратного» потока тепла к облучаемой поверхности, возникающий из-за меньшей электронной теплоемкости глубже лежащего слоя алюминия по сравнению с поверхностным слоем никеля. Можно согласиться с автором, что эти эффекты, установленные на основе развитых теоретических подходов, демонстрируют их обоснованность, полноту и предсказательную способность.

Достоверность результатов

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 по диссертации написано совместно с экспериментаторами и посвящено анализу и интерпретации экспериментальных наблюдений. Поэтому можно заключить, что теоретические модели диссертации развивались в плотном взаимодействии с экспериментальными работами по ультракороткому лазерному облучению.

Практическая значимость

Развитые теоретические модели двухтемпературной гидродинамики могут практически использоваться при разработке лазерных технологий обработки и наноструктурирования материалов ультракороткими мощными лазерными импульсами.

Публикации и апробация работы

В списке публикаций автора в диссертации и автореферате указано 35 публикаций, из которых 20 являются статьями по материалам конференций, а 15 опубликованы в журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus и рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ. Такое количество публикаций соответствует требованиям к докторским диссертациям. Помимо указанных в списке, у автора есть большое количество публикаций, в которых разработанные теоретические модели использовались для анализа условий при короткоимпульсном лазерном облучении и которые можно было бы дополнительно включить в список работ по диссертации. Результаты исследования полно представлены автором на научных конференциях различного уровня.

После ознакомления с диссертационной работой возникли следующие вопросы и замечания:

1. Основу работы составляет численный эксперимент, в котором оригинальным является учет двухтемпературности. При этом недостаточно внимания уделено численной схеме решения уравнений теплопроводности и гидродинамики и ее тестированию. Проводилось ли решение тестовых задач? Проводилось ли сравнение с однотемпературным приближением? Полученные результаты представляются физически правильными, но тестирование численной схемы и модели было бы не лишним. При симметричном гауссовом профиле пучка по времени, с какого отрицательного момента времени начинались расчеты? В тексте не обсуждается, почему можно пренебречь потерями на тепловое излучение со свободной поверхности? На рис. 2.6 и 2.7 наблюдаются осцилляции за фронтом ударной волны - является ли это численным эффектом?

2. При рассмотрении критерия разрушения в разделе 1.4 считается, что образование единичной полости сразу приводит к разрушению. В то же время из МД-расчетов и эксперимента известно, что при динамическом растяжении образуется множество очагов разрушения и их концентрация растет со скоростью деформации, что особенно актуально для рассматриваемых субпикосекундных импульсов облучения. Причиной является конечная скорость роста полостей, которая обеспечивает релаксацию растянутого вещества только при наличии достаточно большой концентрации полостей. Это обстоятельство совершенно не учитывается в используемом критерии разрушения.

3. 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. На рис. 4.6 приводится сравнение с экспериментом для случая колебаний серебряной пленки, при этом эксперимент демонстрирует более сильное затухание колебаний и вдвое меньший период (первое колебание); с чем это может быть связано?

4. Разница температур электронной и ионной подсистем возникает из-за ограниченной мощности теплообмена между подсистемами. Почему в качестве критерия двухтемпературности используется время импульса, а не мощность энерговыделения?

5. Рис. 2.5 показывает, что для диэлектриков электронное давление пренебрежимо мало по сравнению с ионным. Электронная теплопроводность, как говорится в тексте, также не работает. В чем смысл использования двухтемпературной гидродинамики в этом случае?

6. В разделе 1.3.1 непонятно, использовалось ли приближение (1.29) для электронной теплопроводности в каких-то из решенных задач, либо эта формула приведена только для качественного анализа.

7. В работе присутствуют стилистические и орфографические ошибки, опечатки и неаккуратности в оформлении. Обозначения не всегда унифицированы. Например, на стр. 30 одна и та же величина обозначается

как x_c и как σ_c . Не везде указаны единицы измерения, например, в уравнении (1.47). На рис. 2.4(Т) отсутствует кривая для электронной температуры при малом флюенсе. Введение: «микроинтерферометрия с отраженногым импульсом». Стр. 17: «металлические пленки на стеклянных поддлжках», «с значительным различием», «залота в воде наизолее». Стр. 23: «должна с достаточно хорошо выполнятся». Стр. 26: «чтобы от занулялся при нулевой температуре». Предложение почти на всю страницу на стр. 35 не согласовано. Стр. 57: «В работе [38] образование зародышеу». Стр. 64: «заволнено двухфазной смесью». Стр. 69: «помощью видимого микроскопа». Стр. 139: «Молекулярно—динамической моделирование». Стр. 149: «левее профиля плотности, показанном на рис. 5.12». Стр. 165: « $\tau_L = 0.5$ пс».

Перечисленные вопросы и замечания носят уточняющий характер, не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы Хохлова В.А. 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 Хохлова В.А. изложен ясно, результаты представлены четко, проиллюстрированы 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.

Доклад по диссертационной работе Хохлова Виктора Александровича заслушан и обсужден на объединенном семинаре физического факультета ФГБОУ ВО «ЧелГУ» 10 февраля 2025 г.

Отзыв составил:

заведующий кафедрой общей и теоретической физики,
доктор физико-математических наук,

доцент

_____ Майер Александр Евгеньевич
27.02.25

Адрес: 454001, Челябинская обл., г. Челябинск,
ул. Братьев Кашириных, д. 129,

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Челябинский государственный университет»

Тел.: 8(351)799-71-61

e-mail: mayer@csu.ru

