

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Хохлова Виктора Александровича

«Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Диссертация Хохлова В.А. посвящена решению сложной и важной проблемы – разработке математических моделей для изучения процессов, происходящих в веществе конденсированных мишеней при воздействии ультракоротких лазерных импульсов. Основная сложность, возникающая при теоретическом описании процессов фемто- и пикосекундного временного диапазонов, состоит в необходимости учета обмена энергией между электронной и фононной (ионной) подсистемами. В диссертации используется двухтемпературная одножидкостная одномерная гидродинамическая модель, для замыкания которой привлекается ряд полуэмпирических и аппроксимационных соотношений для уравнения состояния, коэффициента электронной теплопроводности, коэффициента электрон-фононного обмена, коэффициента поверхностного натяжения и некоторых других. Для анализа также используются результаты молекулярно-динамического моделирования. В диссертации были изучены двухтемпературные эффекты при лазерной абляции, в том числе плавление за счет электрон-фононного взаимодействия, объяснены наблюдаемые кольца Ньютона на микрофотографиях зондирующего импульса, снижение порога абляции в диэлектриках, увеличение скорости упругой волны из-за влияния сдвиговых напряжений, образование наночастиц золота в результате развития неустойчивости Рэлея-Тейлора; выполнена интерпретация экспериментальных данных для наноламинатов.

Актуальность работы. Ультракороткие лазерные импульсы пико- и фемтосекундной длительности оптического или мягкого рентгеновского диапазона в настоящее время получили широкое распространение в науке и технике. Это объясняется малым влиянием подобных импульсов на вещество вблизи зоны их воздействия, что имеет большое значение при обработке материалов, в биологии и медицине. Было установлено, что для ультракоротких лазерных импульсов наблюдается ряд эффектов, которые не проявляются при воздействии более длинных импульсов. В частности, обмен энергией между электронной и фононной подсистемами приводит к особенностям плавления и абляции вещества мишени. Важное технологическое значение имеет и воздействие множественных ультракоротких лазерных импульсов для создания микрорельефа поверхности. Необходимость теоретического объяснения наблюдаемых в экспериментах явлений определяет актуальность работы.

Научная новизна. В диссертации получен ряд новых результатов, из которых можно выделить следующие. Сформулированная автором двухтемпературная модель впервые позволила корректно описать двухтемпературные эффекты в конденсированных мишенях. Эта модель с использованием предложенного автором критерия разрыва дает правильное описание процесса лазерной абляции. Учет радиального распределения интенсивности лазерного излучения позволило объяснить наблюдающиеся на микрофотографиях отраженного зондирующего импульса «кольца Ньютона». Дополнительное уравнение для

плотности свободных электронов в зоне проводимости диэлектриков дало возможность описать снижение порога абляции по сравнению с более длительными импульсами. В расчетах с учетом сдвиговых напряжений была получена скорость волны сжатия, соответствующая экспериментальным данным. Было дано объяснение образованию наночастиц при лазерной абляции золота в воду в результате развития неустойчивости Рэлея-Тейлора и процесса диффузии золота.

Теоретическая и практическая значимость работы. Диссертация вносит существенный вклад в теоретические аспекты процесса взаимодействия ультракороткого лазерного излучения с веществом. Было выявлено существенное влияние обмена энергией между электронной и фононной подсистемами на плавление и абляцию, найдено объяснение более высокой скорости распространения волны сжатия в металлических мишенях за счет сдвиговой упругости, выполнена интерпретация экспериментальных данных по воздействию ультракоротких лазерных импульсов на нанопластинки. Несомненна и практическая значимость диссертации: для корректного описания процессов в мишенях при воздействии ультракоротких лазерных импульсов необходимо учитывать двухтемпературные эффекты, а полученные результаты будут полезны для оптимизации технологических процессов с применением лазерных технологий, в том числе при лазерной обработке материалов и производстве наночастиц с помощью лазерной абляции.

Хотелось бы отдельно выделить два важных результата, полученных в диссертации. Первый касается объяснения явления сверхупругости. Ультракороткие лазерные импульсы порождают в мишенях чрезвычайно короткую волну сжатия треугольной формы, которая распространяется со скоростью упругой волны в твердом теле. Весьма интересным является тот факт, что амплитуда волны сжатия значительно превосходит классический предел упругости на ударной адиабате, при этом сжатое вещество оказывается в метастабильном состоянии. Последующий распад этого состояния происходит через релаксацию напряжения сдвига с переходом к пластическому состоянию. Выявленный механизм подтверждается молекулярно-динамическим моделированием и наблюдается экспериментально. Вторым результатом состоит в объяснении процесса формирования наночастиц при лазерной абляции золота в воду. Автор анализирует два механизма: за счет неустойчивости Рэлея-Тейлора и посредством диффузии золота в воду и последующей конденсации. Эти механизмы дают различные размеры и обеспечивают существенно различный выход наночастиц при производстве.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Каждая глава сопровождается списком публикаций, в которых отражены основные результаты главы.

В первой главе приведено теоретическое обоснование двухтемпературной одножидкостной гидродинамической модели, рассмотрены основные уравнения и замыкающие соотношения. Проанализирован нагрев металлической мишени ультракоротким лазерным импульсом, распространение области плавления, волны сжатия и растяжения. Подробно описан процесс лазерной абляции, возникновение кратера и откольной оболочки, а также колец Ньютона, наблюдаемых на микрофотографиях зондирующего импульса.

Вторая глава посвящена анализу процесса абляции в диэлектриках. Рассмотрено дополнительное уравнение для эволюции плотности электронов в зоне проводимости и

необходимые для его решения кинетические коэффициенты. Рассчитан порог абляции и продемонстрировано его значительное снижение по сравнению с более длительными импульсами.

В третьей главе обсуждается роль сдвигового напряжения в процессе распространения волны сжатия при нагружении металлических мишеней ультракоротким лазерным импульсом. Показано, что учет сдвиговых напряжений позволяет корректно описать экспериментальную скорость волны сжатия. Кроме того, приведено теоретическое обоснование явления сверхупругости – распространения ударной волны с продольной скоростью звука в случае, когда напряжения в ударной волне значительно превосходят предел упругости.

В четвертой главе рассматривается воздействие ультракоротких лазерных импульсов на тонкие пленки на подложке и на многослойные мишени. Анализируется явление осцилляций и отслоения пленки от подложки. Приводятся результаты моделирования воздействия лазерного излучения на наноламинаты, состоящие слоев никеля и алюминия. Показано, что существуют несколько порогов разрыва, соответствующих разрушению в различных слоях наноламината.

Пятая глава посвящена обоснованию процесса образования наночастиц при лазерной абляции золота в воду. Анализ производится с помощью двухтемпературной гидродинамической модели, а также с помощью метода молекулярной динамики. Подробно рассматривается явление образования «атмосферы» – тонкого нагретого слоя золота, граничащего с водой. С помощью метода молекулярной динамики изучаются два механизма образования наночастиц: за счет неустойчивости Рэлея-Тейлора и посредством диффузии золота из «атмосферы» и последующей конденсации.

В диссертации приведен большой объем фактического материала, сформулирован ряд аппроксимационных зависимостей для термодинамических и кинетических свойств, даны важные теоретические оценки.

Диссертация не лишена недостатков, которые можно сформулировать в виде ниже-следующих **замечаний**.

1. Предположение (1.1) о том, что свободная энергия двухтемпературной системы разбивается на сумму слагаемых, каждое из которых зависит только от одной температуры, вообще говоря, нуждается в теоретическом обосновании. Так, в кристаллах в рамках квазигармонического приближения это можно сделать на основе приближения Борна-Оппенгеймера, при этом ионный вклад будет зависеть также и от электронной температуры.
2. На стр. 22 присутствует неверное утверждение по поводу использования матрицы плотности в методе функционала плотности. В реальности в методе функционала плотности ключевой величиной является электронная плотность.
3. В диссертации упоминаются метастабильные состояния, но их роль подробно не обсуждается. В частности, в списке литературы отсутствует одна из наиболее цитируемых работ на эту тему [Povarnitsyn M.E. Phys. Rev. B **75**, 235414 (2007)].
4. Практически во всей диссертации используется формула (1.46) для поглощения лазерного излучения, в которой считается известным коэффициент отражения и глубина поглощения. Однако для длинных импульсов, рассматриваемых в

- главе 5, эти предположения могут нарушаться, и необходимо решать уравнение Гельмгольца для напряженности электрического или магнитного поля на заданном пространственном профиле комплексной диэлектрической проницаемости.
5. При воздействии на диэлектрики (глава 2) формула (1.46) также может нарушаться в силу того, что процесс поглощения становится неоднородным из-за большой глубины поглощения. Обоснование использования одномерного приближения для поглощения рентгеновского излучения в главе 2 отсутствует.
 6. В диссертации присутствует большое количество опечаток, некоторые обозначения в формулах не расшифрованы, что затрудняет чтение.

Однако указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Хохлова В.А. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертации опубликованы в тридцати пяти рекомендованных ВАК статьях в ведущих российских и зарубежных журналах, а также многократно докладывались на российских и международных конференциях. Постановка всех задач, анализ результатов и выводы были сделаны непосредственно автором работы.

Таким образом, можно констатировать, что диссертация Хохлова В.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Хохлов Виктор Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

11 марта 2025 г.

Отзыв составил:

Заведующий теоретическим отделом
им. Л.М. Бибермана ОИВТ РАН,
д.ф.-м.н.

125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13,

Левашов Павел Ремирович

6, e-mail: pasha@jiht.ru

Подпись Левашова Павла Ремировича
Зам. директора ОИВТ РАН

125412, г. Москва, ул. Ижорская,
e-mail: ivanova-n@jiht.ru

Н.Н. Иванова

тел.: +7(495)485-96-63,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, тел.: +7(495)485-83-45, сайт: <https://jiht.ru/>, e-mail: office@jiht.ru