

На правах рукописи

МИГДАЛ Кирилл Петрович

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ С ВОЗБУЖДЁННОЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМОЙ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая
теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии “Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова”.

Научный руководитель: д. ф.-м. н., в.н.с, зав. сектором,
Иногамов Наиль Алимович.
(ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау)

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н., в.н.с.,
Трибельский Михаил Исаакович
(МГУ им. М.В. Ломоносова);
к. ф.-м. н., в.н.с, доцент,
Канавин Андрей Павлович
(ФИАН).

Ведущая организация: Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится “ ” 2018 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур РАН по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН. Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр.2. ОИВТ РАН

Автореферат разослан “ “ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.110.02
доктор физико-математических наук, профессор М.М. Васильев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединённый институт высоких температур
Российской Академии Наук, 2017

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Рассматривается возбуждение электронной подсистемы в результате поглощения электронами металла энергии лазерного импульса субпикосекундной длительности и умеренной интенсивности. Указанная длительность оказывается меньше, чем время достижения теплового равновесия в металле [1]. Характерные времена релаксации за счёт электрон-электронных и ион-ионных столкновений значительно меньше, чем время электрон-ионной релаксации [2,3]. Два вышеуказанных фактора позволяют рассматривать электроны и ионы металла после лазерного облучения как две квазиравновесные подсистемы до достижения электрон-ионной релаксации. Рассмотрены лазерные импульсы с энергиями, вкладываемыми на единицу площади мишеней, около порогов плавления и абляции. В таком диапазоне вложенных энергий время электрон-электронной релаксации достаточно мало по сравнению с временем электрон-ионной релаксации [1], но, с другой стороны, эффективная частота электронных столкновений много меньше частоты лазерного импульса [4]. В работе использовались метод функционала плотности, аналитическое решение кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации и теория Каганова-Лифшица-Танатарова [5].

Актуальность работы.

Учёт электронных термодинамических и кинетических свойств необходим при двухтемпературном моделировании этапа передачи поглощённой энергии невозбуждённым электронам и решётке [6]. Двухтемпературная модель, впервые предложенная Анисимовым [7], является в настоящее время одним из основных инструментов изучения процессов, вызванных поглощением лазерного импульса субпикосекундной длительности. Предсказания модели подтверждены экспериментальными данными для измеряемых величин, таких как порог абляции, сдвиг фазы и изменение коэффициента отражения лазерного импульса, а также коэффициент электрон-

фононного теплообмена (см., например [3]). Этап передачи поглощённой энергии невозбуждённым электронам и решётке определяет дальнейшую динамику процессов в облучённой субпикосекундным лазерным импульсом мишени [7]. Поэтому исследования, являющиеся целью данной работы, имеют непосредственное значение для понимания условий возникновения лазерной абляции. Опубликованы результаты исследований об использовании лазерной абляции для задач наноплазмоники, обработки поверхности металлов, магнито-плазмоники, опто-плазмон-акустики, получения наночастиц и медицины [6].

При проведении двухтемпературных расчётов [7] необходимы зависимости электронных давления, теплоёмкости, теплопроводности и электрон-фононного теплообмена как функций электронной температуры и плотности. В случае электронной теплопроводности добавляется зависимость от ионной температуры. Использование для всех указанных здесь величин зависимостей, справедливых при равновесии электронной и ионной подсистем, невозможно. Это вызвано существенным ростом данных величин вместе с увеличением электронной температуры [6].

Имеется два подхода к определению термодинамических и кинетических характеристик возбуждённой электронной подсистемы: аналитические модели [8,9,10,11] и расчёты на основе метода функционала плотности [12, 13]. Расчёты согласно второму подходу можно рассматривать как достаточно точные применительно к поставленной здесь задаче. Предсказываемые согласно таким расчётам результаты для электронного давления, электронной теплопроводности обнаружены в хорошем согласии с данными расчётов с помощью подходов Томаса-Ферми с поправками [14] и высокотемпературных плазменных моделей [15] при высоких давлениях и температурах, соответственно. Необходимо также упомянуть, что расчёты методом функционала плотности, в особенности,

если они сопряжены с моделированием динамики атомов, являются вычислительно ёмкими и не годятся для проведения качественных оценок, что возможно при использовании аналитических моделей.

Существующие аналитические модели термодинамики и кинетики возбуждённой электронной подсистемы металла имеют ряд недостатков. Используются либо низкотемпературные асимптотики термодинамических потенциалов и кинетических коэффициентов [15], либо феноменологические функциональные зависимости [16]. Результаты расчётов методом функционала плотности показывают [13,17], что данный подход в случае переходных и благородных металлов становится неприменимым уже при температурах около 10 000 – 20 000 К. Наконец, часто используемая модель [18] для расчёта электрон-фононного теплообмена в металлах, содержащих более одной валентной зоной, основана на предположении, что матричный элемент электрон-фононного взаимодействия не зависит от передаваемого импульса, которое требует проверки.

Цели работы.

1. Разработка аналитической модели электронной термодинамики и кинетики для металла с возбуждённой электронной подсистемой. Вывод о применимости модели с помощью расчётов на основе метода функционала плотности и квантовой молекулярной динамики.

2. Обеспечение данными о зависимостях электронных термодинамических и кинетических величин для металлов в состоянии с возбуждённой электронной подсистемой, необходимых для двухтемпературных гидро-динамических расчётов.

3. Вывод о величине влияния вышеописанных данных на динамику электрон-ионной релаксации в двухтемпературных гидродинамических расчётах.

Научная новизна работы.

1. Разработана двухпараболическая модель электронных термодинамики и кинетики металлов с различной зонной

структурой в состоянии с возбуждённой электронной подсистемой.

2. Исследован вклад электронов различных валентных зон в термодинамические и кинетические характеристики для простых, благородных и переходных металлов с помощью двухпараболической модели.

3. Рассчитаны вклады возбуждённой электронной подсистемы в двухтемпературные уравнения состояния простых, переходных и благородных металлов с помощью метода функционала плотности.

4. Показано влияние изменения электронной структуры при электронном нагреве и гидростатическом деформировании на электрон-фононный теплообмен и вклад электрон-электронных столкновений в теплопроводность для меди и золота.

5. На примере тантала показана возможность усовершенствования двухпараболической модели на случай расщепления d-зоны валентных электронов и/или наличия вблизи двух валентных зон сильно локализованной зоны f-электронов.

Достоверность результатов.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается согласием с экспериментальными данными и результатами численного моделирования, в том числе опубликованными в ведущих мировых научных журналах и представленных на международных конференциях.

Практическая ценность работы.

Результаты работы могут быть использованы как источник необходимых данных при проведении двухтемпературного моделирования субпикосекундной лазерной абляции. Показано, что результаты анализа экспериментов по выходу ударных волн на тыльную поверхность субмикронной никелевой фольги зависят от точности описания двухтемпературной стадии. Разработанная двухпараболическая

модель может использоваться для оценки электронных характеристик металлов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Двухпараболическая модель как подход для расчёта электронных термодинамических и кинетических свойств для металлов с возбуждённой подсистемой.

2. Изменение плотности электронных состояний при ультракоротком лазерном нагреве в термодинамических и кинетических характеристиках электронной подсистемы металлов.

3. Расширение двухпараболической модели на случай металлов с расщеплением валентной d-зоны по магнитному квантовому числу (tg-eg расщепление). Вклад заполненной 4f зоны в термодинамические свойства возбуждённой электронной подсистемы тантала.

4. Трёхчленная модель уравнения состояния для металлов с возбуждённой электронной подсистемой при вложении субпикосекундным лазерным импульсом энергии на единицу площади в диапазоне порогов абляции и плавления

Личный вклад автора.

Все представленные в диссертационной работе результаты получены либо лично автором, либо при непосредственном участии автора. Все представленные в диссертационной работе результаты расчетов, за исключением процитированных данных, используемых автором для сравнения с опубликованными данными, получены лично автором.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих отечественных и международных конференциях: VI, VII и VIII научно-технические конференции молодых ученых “ВНИИА-2012”, “ВНИИА-2013” и “ВНИИА-2014” (Москва, 2012-2014); Научно-координационная сессия РАН “Исследования неидельной плазмы” (Москва, 2012, 2015); Международные конференции High Power Laser Ablation (Santa Fe, USA, 2012, 2014); XXVIII и XXX Международные

конференции “Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество” (п. Эльбрус, 2013, 2015); XXIX и XXXI Международные конференции “Уравнения состояния вещества” (п. Эльбрус, 2014, 2016); Международный симпозиум Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (Санкт-Петербург, 2013;); 18-я Международная конференция по ударному сжатию и конденсированному состоянию вещества (SCCM, Seattle, USA, 2013), 12-я и 13-я Международные конференции Conference of Laser Ablation (Ischia, Italy, 2013; Cairns, Queensland, Australia, 2015); 12-я школа IUVSTA по лазерам в науках о материалах “Laser Engineering of Surfaces and Coatings” (Venice, Italy, 2014), 9-я Международная конференция по фотовозбужденным процессам и их применениям (ICPERA, Matsue, Japan, 2014), 8-я Всероссийская школа-семинар «Аэротермодинамика и физическая механика классических и квантовых систем АФМ-2014» (Москва, 2014), 36-й Международный симпозиум «Прогресс в исследованиях электромагнетизма» (PIERS, Prague, Czech Republic, 2015).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ в реферируемых научных журналах, 13 работ в сборниках докладов и тезисах российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложена на 238 страницах, включает 61 рисунок, библиографию из 253 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении даётся описание актуальности, научной новизны, достоверности и практической ценности задач, рассматриваемых в работе. Формулируются цели работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор результатов исследований в области субпикосекундного лазерного облучения металлов с умеренным вложением энергии. Приведено описание основных методов исследования в данной области.

В параграфе 1.1 сделан обзор экспериментальных работ, имеющих наибольшее значение с точки зрения полученных результатов. Результаты данных работ подтверждают основные утверждения, используемые при теоретическом описании и численном моделировании рассматриваемых автором задач.

В параграфе 1.2 рассмотрены выдвинутые теоретические модели и расчётные работы по исследованию электронной зонной структуры и гидродинамики в условиях электрон-ионной релаксации.

В параграфе 1.3 дано описание кинетических свойств электронной подсистемы металла в полуклассическом подходе с описанием столкновений в приближении времени релаксации. Сделано обсуждение теории Каганова-Лифшица-Танатарова, посвящённой изучению электрон-фононного теплообмена в неравновесных металлах.

В параграфе 1.4 приводится краткое описание метода функционала плотности. Делается акцент на расчетах, проводимых с целью рассмотрения металлов с возбужденной электронной подсистемой.

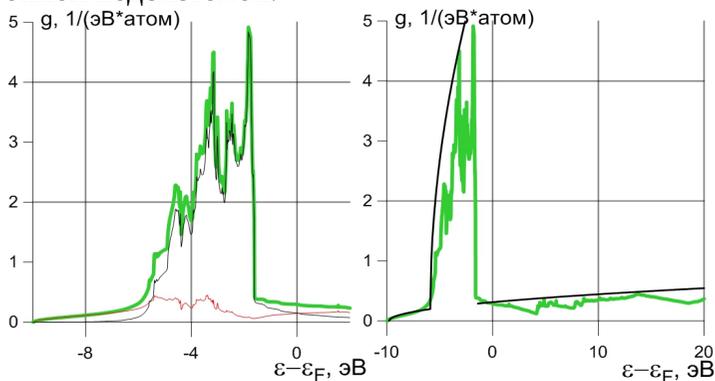


Рис. 1 Плотность электронных состояний меди с помощью метода функционала плотности в коде VASP (зелёная линия) и в рамках двухпараболического приближения. А) Вклады различных зон в методе функционала плотности: s-электроны (красная линия) и d-электроны (чёрная линия). Б) Сравнение данных метода функционала плотности и двухпараболического приближения для полной плотности электронных состояний.

Вторая глава посвящена задаче о расчёте термодинамических свойств возбуждённой электронной подсистемы с помощью двухпараболического приближения.

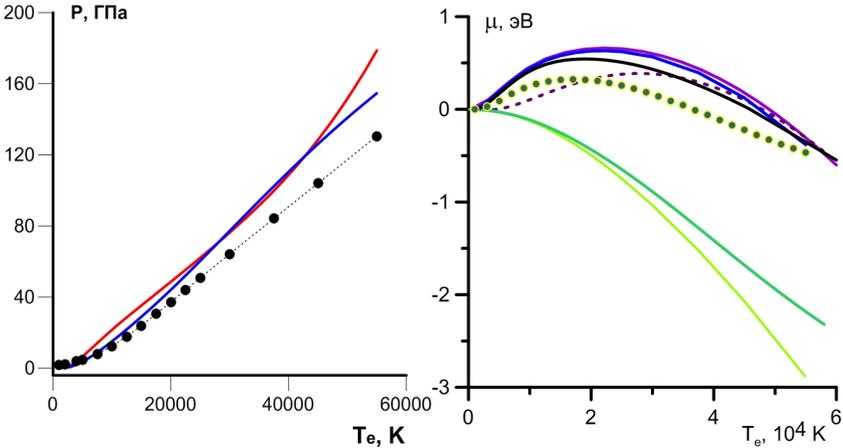


Рис. 2. Слева: Электронное тепловое давление в тантале. Черные кружки - результаты FP LAPW расчёта (Elk), красная линия - приближённая формула для вкладов отдельных зон в модели идеального ферми-газа, синяя линия - расчёт в двухпараболической модели, модифицированной на случай tg-eg расщепления и наличия близко расположенной 4f-зоны. Справа: Химический потенциал тантала, полученный с помощью расчётов МФП (синяя сплошная линия - VASP, сплошная фиолетовая линия - ABINIT, сплошная чёрная линия - Elk). Представлены результаты нескольких моделей: двухпараболическая - сплошная салатная линия, двухпараболическая с f-параболой - сплошная зелёная линия, трёхпараболическая - штриховая фиолетовая линия. Результат использования трёхпараболической модели с f-параболой показан линией с зелёными кружками.

В параграфе 2.1 дано описание разработанной двухпараболической модели электронных термодинамики и кинетики металлов с возбуждёнными электронами. Для построения ПЭС (рис. 1) и проверки предсказанных термодинамических характеристик использовались метод псевдопотенциалов, реализованный в кодах VASP [20, 21] и ABINIT [22] и полноэлектронный метод линейаризованных присоединенных плоских волн (FP LAPW), реализованный в

коде Elk [23]. Исследованы вклады электронов отдельных валентных зон в термодинамические электронные характеристики металла в двухтемпературном состоянии.

В параграфе 2.2 изучено влияние достигаемой при субпикосекундном лазерном нагреве электронной температуры на поведение плотности электронных состояний в области энергий валентных зон. Показано, что для каждой группы металлов данное влияние имеет особый характер. В случае благородных металлов происходит смещение d-зоны при нагреве до нескольких 10000K на величину порядка ширины данной зоны. В случае переходных металлов за исключением никеля и платины изменения плотности электронных состояний незначительны. Аналогичное поведение обнаружено и для плотности электронных состояний алюминия.

В параграфе 2.4 рассматривается задача об определении электронного давления в рамках двухпараболического приближения. Рассмотрен случай тантала, электронная структура которого содержит две дополнительные сложности для построения модели электронной структуры в двухпараболическом приближении. Это наличие tg-eg расщепления зоны валентных d-электронов, приводящее к появлению провала значений плотности электронных состояний вблизи энергии Ферми и близость полувалентной $4f^{14}$ зоны к области валентных зон. Показано, что эти сложности заметным образом сказываются на термодинамических характеристиках тантала (рис. 2). Использование метода полноэлектронных DFT расчетов FP LAPW обнаружено существенное влияние на электронную теплоемкость электронов $4f^{14}$ электронной зоны при электронном нагреве, начиная с температур 3 эВ и выше.

Третья глава посвящена получению вкладов в двухтемпературные уравнения состояния металлов, отвечающих холодному гидростатическому деформированию и электронному нагреву. Исследовано влияние как гидростатического сжатия, так

и электронного нагрева на термодинамические свойства электронной подсистемы.

В параграфе 3.1 показано влияние сжатия совместно с электронной температурой на плотность электронных состояний. Используются расчёты методом функционала плотности как в псевдопотенциальном, так и в полноэлектронном подходах.

В параграфе 3.2 приводятся описание и результаты расчета изотерм нулевой ионной и электронных температур для свободной энергии и давления при гидростатическом деформировании в диапазоне от двукратного растяжения до двукратного сжатия металла. Показано согласие с экспериментальными данными для холодного гидростатического сжатия в алмазных наковальнях, ударно-волновым сжатием и методом динамического сжатия рампой [24].

В параграфе 3.3 проводится рассмотрение совместного действия гидростатического сжатия/растяжения и электронного нагрева на электронные свойства методом функционала плотности. Получены двухтемпературные уравнения состояния золота, меди, железа и тантала при холодных ионах (рис. 3). Приведена общая форма двухтемпературного уравнения состояния, позволяющая использовать результаты расчётов совместно с известными широкодиапазонными уравнениями состояния вещества. Рассмотрены ограничения, позволяющие использовать принятую в работе форму двухтемпературного уравнения состояния. Сущность этих ограничений - в возникновении заметного влияния электронной подсистемы на свойства, определяемые ионами, и наоборот. Показано, что влияние каждой подсистемы на свойство другой является ограниченным, что позволяет использовать имеющуюся модель двухтемпературного состояния металла. Рассмотрено влияние нагрева электронов на положение точки полиморфного α - ϵ перехода в железе. Рассмотрено влияние электронного нагрева на спинодаль золота.

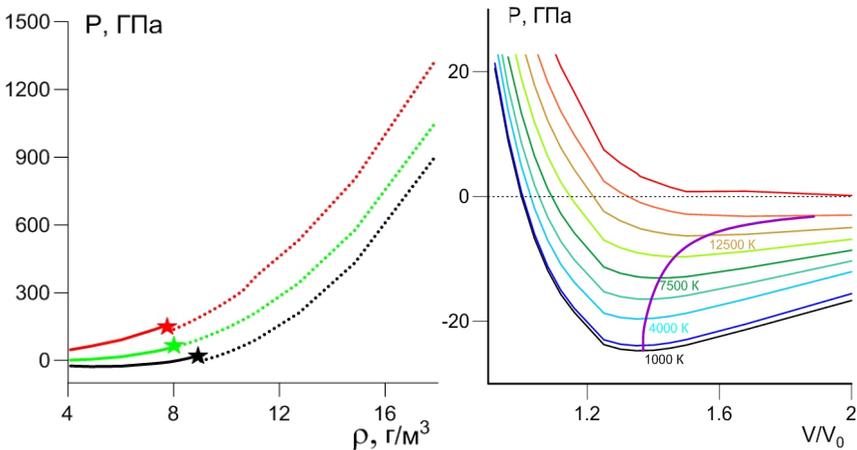


Рис. 3. Слева: Давление в железе с холодными ионами при гидростатическом сжатии/растяжении и нескольких T_e : 1000 К (черные линии), 25000 К (зелёные), 55000 К (красные). Сплошные линии - изотермы электронной температуры ОЦК железа, пунктирные - ГПУ железа. Звёздочками отмечены точки полиморфного ОЦК-ГПУ перехода. Слева: изотермы электронной температуры золота с холодными ионами. Фиолетовой линией показано смещение минимума давления (спинодаль) с ростом T_e .

В параграфе 3.4 проведено сравнение результатов для термодинамических характеристик с данными расчетов на основе иных методов, проведенными независимо другими исследователями. Рассмотрены примеры золота и алюминия. Для сравнения использованы данные расчётов Ю. В. Петрова [25], полученные в модели идеального Ферми-газа, и Н. А. Смирнова [14], рассчитанные в полноэлектронном методе FP-LMTO.

Четвертая глава содержит описание предложенной схемы расчета кинетических коэффициентов на основе данных двухпараболического приближения, решений кинетического уравнения Больцмана в приближении времени релаксации и теории Каганова-Лифшица-Танатарова для электрон-фононного теплообмена.

В параграфе 4.1 приведены основные выражения электронной кинетики в приближении времени релаксации и дано обсуждение условий применимости этого приближения.

Дисперсионные соотношения для электронов различных зон находятся из предложенного двухпараболического приближения. Поиск частоты электрон-ионных столкновений произведен с помощью модели Друде. При рассмотрении электрон-фононного взаимодействия делается пренебрежение в силу квазиупругого приближения процессами переброса электрона из первой зоны Бриллюэна.

В параграфе 4.2 обосновывается пренебрежение d -электронами как каналом переноса, обсуждаются вклады ss - и sd -столкновений в суммарной частоте электрон-электронных столкновений, а также результирующее влияние таких столкновений на величину коэффициента электронной теплопроводности.

В параграфе 4.3 дано обсуждение эффекта электронного экранирования при описании электрон-электронных столкновений.

В параграфе 4.4 дано описание расширения вычислительной схемы для получения термоэлектрических характеристик.

В параграфе 4.5 приводятся результаты расчета коэффициента электронной теплопроводности для простых и переходных металлов. Также проведено сравнение полученных значений кинетических коэффициентов, найденных в двух предыдущих пунктах, с экспериментальными данными и данными вычислений методом квантовой молекулярной динамики. Показано, что данные для коэффициента электронной теплопроводности находятся в удовлетворительном согласии с данными расчетов по методу квантовой молекулярной динамики с применением формулы Кубо-Гринвуда.

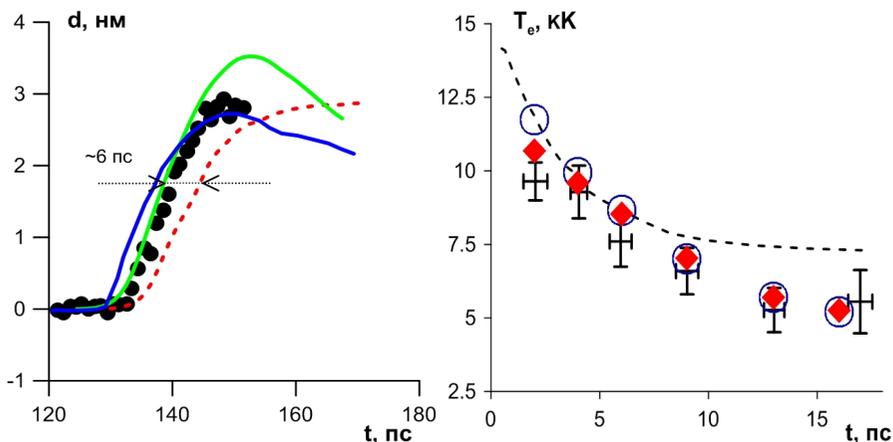


Рис. 4. Слева: Смещение задней стороны мишени при выходе УВ в зависимости от времени. Представлены данные эксперимента [27] (чёрные кружки), МД моделирования (синяя сплошная линия) и двух двухтемпературных расчётов. Результат использования представленной здесь двухпараболической модели показан сплошной зелёной линией, а при использовании выражений согласно [17], выход отображается красной штриховой линией. Справа: Интегральная электронная температура медной плёнки, облучённой субпикосекундным лазерным импульсом. Экспериментальные данные [28] показаны точками с областями ошибок. Результат двухтемпературного гидродинамического моделирования, полученный для фиксированных длины экстинкции 125 нм и постоянной плотности показан синими кружками, а схожие данные на основе формулы с экспериментально определённым коэффициентом массового поглощения и профилем плотности из расчёта представлены красными ромбами. Сплошная линия соответствует двухтемпературному моделированию, проведённому авторами работы [28].

В параграфе 4.6 дана формулировка модифицированного подхода, основанного на положениях теории Каганова-Лифшица-Танатарова и предназначенного для описания явления электрон-фононного теплообмена в металлах с нагретой электронной подсистемой. Приводятся результаты для коэффициента электрон-фононного теплообмена для всех рассмотренных металлов. Дано обсуждение характерных различий в поведении данной величины, вызванных

особенностями электронной структуры каждого типа. даны результаты сравнения с имеющимися экспериментальными данными [26] и расчётными работами [17].

Пятая глава посвящена анализу результатов использования предложенной двухпараболической модели в методах двухтемпературной гидродинамики и классической молекулярной динамики.

В параграфе 5.1 даны результаты использования предложенной модели при двухтемпературном гидродинамическом моделировании субпикосекундного лазерного нагрева в объёмных мишенях, проведенном Д. К. Ильницким. Показано, что результаты 2ТГД с применением представленных в работе результатов находятся в согласии с экспериментальными данными (рис. 4, слева).

В параграфе 5.2 приведены результаты сравнения расчётов методами двухтемпературного моделирования и квантовой молекулярной динамики для описания эксперимента [28] по воздействию субпикосекундного лазерного импульса на пленку меди толщиной 70 нм. Получено количественное согласие (рис. 4, справа) при описании эксперимента [28] в предложении о равенстве глубины прогрева толщине пленки. Обнаружено отсутствие влияние величины электронной теплопроводности при описании электрон-ионной релаксации в пленках столь малой толщины.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Получена двухпараболическая модель термодинамических свойств и кинетических коэффициентов электронной теплопроводности и электрон-фононного теплообмена для металлов при электрон-ионном неравновесии. Данная модель основана на применении метода функционала плотности и приближения времени релаксации для электронов, имеющих научное признание и обоснование их использования при рассмотрении исследуемых автором задач.

2. В модели введена эффективная масса электрона, что позволяет использовать полуклассическое приближение для расчёта транспортных свойств.

3. Получены термодинамические и кинетические величины (электронные теплоёмкость и давление, электронная теплопроводность, коэффициент электрон-фононного теплообмена) для 7 металлов (алюминий, золото, медь, железо, никель, платина, тантал) с разделением вкладов валентных зон.

4. С помощью метода функционала плотности рассчитаны вклады в двухтемпературные уравнения состояния для железа, золота, меди и тантала, определяющие вклады нулевой равновесной температуры и электронного нагрева в двухтемпературное уравнение состояния.

5. С помощью метода функционала плотности рассчитаны вклады холодного сжатия/растяжения и электронного нагрева в широкодиапазонные уравнения состояния золота, меди, железа и тантала.

6. Данные двухпараболической модели пригодны для проведения численного моделирования в рамках двухтемпературной гидродинамики. Результаты апробации в опубликованных работах показывают согласие с экспериментальными данными при использовании данных этой модели..

7. Показано, что в ряде случаев должен проводиться учёт ранее не принимаемых во внимание эффектов в расчётах термодинамических и кинетических электронных характеристик. Это зависимость плотности электронных состояний благородных металлов от электронной температуры, зависимость электрон-фононного теплообмена от предыдущего эффекта, влияние расщепления валентной d-электронной зоны под действием сил кристаллического поля для ряда переходных металлов на все рассчитываемые в модели характеристики, влияние близкой к валентным f-электронной зоны на химический потенциал и электронную теплоёмкость в тантале.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В реферируемых научных журналах:

1. Петров, Ю. В., Иногамов, Н. А., Мигдал, К. П. Теплопроводность и коэффициент электрон-ионного теплообмена в конденсированных средах с сильно возбужденной электронной подсистемой. // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2013. Т. 97. С. 24-31.
2. Electron-ion relaxation, phase transition, and surface nanostructuring produced by ultrashort laser pulses in metals. / Inogamov, N. A., Zhakhovsky, V. V., Petrov, Yu. V., Ashitkov, S. I., Khishchenko, K. V., Migdal, K. P., Ilnitsky, D. K., Emirov, Yu. N., Shepelev, V. V., Oleynik, I. I., Agranat, M. B., Andriyash, A. V., Anisimov, S. I., and Fortov, V. E. // Contributions to Plasma Physics. 2013. V. 53. N. 10. P. 796-810.
3. Действие ультракороткого лазерного импульса на металлы: двухтемпературная релаксация, вспенивание расплава и замораживание разрушающейся нанопены. / Иногамов, Н. А., Жаховский, В. В., Петров, Ю. В., Хохлов, В. А., Ашитков, С. И., Мигдал, К. П., Ильницкий, Д. К., Комаров, П. С., Агранат, М. Б., Анисимов, С. И., Фортов, В. Е. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. В. 5. С. 5-26.
4. Петров, Ю. В., Иногамов, Н. А., Мигдал, К. П. Эффективные частоты электронных s-s- и s-d-столкновений в никеле при высоких температурах электронов, вызванных действием фемтосекундных лазерных импульсов. // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2014 Т. 4, В. 3, С. 6-15.
5. Роль геометрических параметров при фемтосекундной лазерной абляции. Физико-химическая кинетика в газовой динамике. / Иногамов, Н.А., Жаховский, В.В., Хохлов, В.А., Хищенко, К.В., Петров, Ю.В., Мигдал, К.П. // 2014. Т. 15. В. 5. С. 5-36.

6. Two-temperature equation of state for aluminum and gold with electrons excited by an ultrashort laser pulse. / Petrov, Yu. V., Migdal, K. P., Inogamov, N. A., Zhakhovsky, V. V. // Applied Physics B. 2015. V. 119. N. 3. P. 401-411.
7. Hydrodynamics driven by ultrashort laser pulse: simulations and the optical pump – X-ray probe experiment. / Inogamov, N. A., Zhakhovsky, V. V., Hasegawa, N., Nishikino, M., Yamagiwa, M., Ishino, M., Agranat, M. B., Ashitkov, S. I., Faenov, A. Ya., Khokhlov, V. A., Ilnitsky, D. K., Petrov, Yu. V., Migdal, K. P., Pikuz, T. A., Takayoshi, S., Eyama, T., Kakimoto, N., Tomita, T., Baba, M., Minami, Y., Suemoto, T., Kawachi, T. // Applied Physics B. 2015. V. 119. N. 3. P. 413-419.
8. Equations of state, energy transport and two-temperature hydrodynamic simulations for femtosecond laser irradiated copper and gold. / Migdal, K. P., Ilnitsky, D. K., Petrov, Yu. V., Inogamov, N. A. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. N. 1. P. 012086-1 - 012086-15.
9. Thermal conductivity of condensed gold in states with the strongly excited electron subsystem. / Petrov, Yu. V., Inogamov, N. A., Anisimov, S. I., Khokhlov, V. A., Khishchenko, K. V., Migdal, K. P. // Journal of Physics: Conference Series. 2015. V. 653. N. 1. P. 012087-1 - 012087-12.
11. Heat conductivity of copper in two-temperature state. / Migdal, K. P., Ilnitsky, D. K., Zhakhovsky, V. V., Inogamov, N. A., Petrov, Yu. V., Knyazev, D. V., Levashov, P. R. // Applied Physics A. 2016. V. 122. N. 4. P. 408-412.
12. Inogamov, N. A., Zhakhovsky, V. V., Migdal, K. P. Laser-induced spalling of thin metal film from silica substrate followed by inflation of microbump. // Applied Physics A. 2016. V. 122. N. 4. P. 432-437.
13. Solitary Nanostructures Produced by Ultrashort Laser Pulse. Inogamov, N. A., Khokhlov, V. A., Petrov, Yu. V., Zhakhovsky, V. V., Migdal, K. P. // Nanoscale Research Letters. 2016. V. 11. N. 1. P. 177-186.

14. Dynamics of laser ablation at the early stage during and after ultrashort pulse. / Il'nitsky, D. K., Khokhlov, V. A., Zhakhosky, V. V., Petrov, Yu. V., Migdal, K. P., Inogamov, N. A. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 774. N. 1. P. 012101-012117.

15. Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress. / Albertazzi, B., Ozaki, N., Zhakhovsky, V., Faenov, A., Habara, H., Harmand, M., Hartley, N., Il'nitsky, D., Inogamov, N., Inubushi, Y., Ishikawa, T., Katayama, T., Koyama, T., Koenig, M., Krygier, A., Matsuoka, T., Matsuyama, S., McBride, E., Migdal, K. P., Morard, G., Ohashi, H., Okuchi, T., Pikuz, T., Purevjav, N., Sakata, O., Sano, Y., Sato, T., Sekine, T., Seto, Y., Takahashi, K., Tanaka, K., Tange, Y., Togashi, T., Tono, K., Umeda, Y., Vinci, T., Yabashi, M., Yabuuchi, T., Yamauchi, K., Yumot, H., Kodama, R. // Science Advances. 2017. V. 3. N. 1. P. 16022705 - 16022710.

В реферируемых сборниках статей:

1. Two-temperature thermodynamic and kinetic properties of transition metals irradiated by femtosecond lasers. / Inogamov, N. A., Petrov, Yu. V., Zhakhovsky, V. V., Khokhlov, V. A., Demaske, B. J., Ashitkov, S. I., Khishchenko, K. V., Migdal, K. P., Agranat, M. B., Anisimov, S. I., Fortov, V. E., Oleynik, I. I. // AIP Conference Proceedings. 2012. V. 1464. P. 593-608.

2. Ultrashort laser – matter interaction at moderate intensities: two-temperature relaxation, foaming of stretched melt, and freezing of evolving nanostructures. / Inogamov, N. A., Zhakhovsky, V. V., Petrov, Yu. V., Khokhlov, V. A., Ashitkov, S. I., Migdal, K. P., Il'nitsky, D. K., Emirov, Yu. E., Khishchenko, K. V., Komarov, P. S., Shepelev, V. V., Agranat, M. B., Anisimov, S. I., Oleynik, I. I., and Fortov, V. E. // Proceedings of SPIE. 2013. V. 9065. P. 906502-1 – 906502-14.

3. Migdal, K. P., Petrov, Yu. V., Inogamov, N. A. Kinetic coefficients for d-band metals in two-temperature states created by femtosecond laser irradiation. // Proceedings of SPIE. 2013. V. 9065. P. 906503-1 – 906503-20.

4. MD simulation of steady shock-wave fronts with phase transition in single-crystal iron. / Zhakhovsky, V. V., Migdal, K. P., Inogamov, N. A., Anisimov, S. I. // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1793. N. 1. P. 070003-070007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fann, W. S., Storz, R., Tom, H. W. K., Bokor, J.* // Physical Review B. 1992. V. 46. N. 20. P. 13592 – 13595.
2. *Бежанов, С. Г., Канавин, А. П., Урюпин, С. А.* // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. №9. С.859-865.
3. *Groeneveld, R. H. M., Sprik, R., Lagendijk, A.* // Physical Review B. 1995. V. 51. N. 17. P. 11433 – 11445.
4. *Zhukov, V. P., Chulkov, E. V.* // Physics-Uspekh. 2009. V. 52. N. 2. P. 105 – 136.
5. *Каганов, М.И., Лифшиц, И.М., Танатаров, Л.В.* // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1956. Т. 31. №2. С. 232 - 238.
6. *Gamaly, E.G.* // Physics Reports. 2011. V. 508. P. 91 - 243.
7. *Anisimov, S.I., Kapeliovich, B.L., Perel`man, T.L.* // ЖЭТФ. 1974. V. 39. No. 2. P. 375 - 377.
8. *Иногамов, Н. А., Петров, Ю. В.* // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2010. Т. 137. №3. С. 505 – 529.
9. *Povarnitsyn, M. E., Andreev, N. E., Apfelbaum, E. M., Itina, T. E., Khishchenko, K. V., Kostenko, O. F., Levashov, P. R., Veysman, M. E.* // Appl. Surf. Sci. 2012. V. 258. N. 1. P. 9480 - 9483.
10. *Bezhanov, S. G., Kanavin, A. P., Uryupin, S. A.* // Quantum Electronics. 2016. V.46. N. 2. P. 119 - 124.
11. *Polyakov, D. S., Yakovlev, E. B.* // Journal of Optic Technologies. 2014. V.81. N. 1. P. 24 – 28.
12. *Norman, G., Saitov, I., Stegailov, V., Zhilyaev, P.* // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. N. 4-5. P. 300-310.

13. *Knyazev D. V. and Levashov P. R. // Physics of Plasmas. 2014. V. 21. P. 073302-1 – 073302-14.*
14. *Sin`ko, G. V., Smirnov, N. A., Ovechkin A. A., Levashov P. R., Khishchenko K. V. // High Energy Density Physics. 2013. V. 9. P. 309 – 314.*
15. *Ivanov D.S., Zhigilei, L.V. // Physical Review B. 2003. V. 68. P. 064114-1 – 064114-22.*
16. *Anisimov, S.I., Rethfeld, B. // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3093. P. 192 – 203.*
17. *Lin, Z., Zhigilei, L. V., Celli, V. // Physical Review B. 2008. V. 77. P. 075133-1 – 075133-17.*
18. *Wang, X. Y., Riffe, D. M., Lee, Y.-S., and Downer M. C. // Physical Review B. 1994. V. 50. N. 11. P. 8016 – 8019.*
19. *Kormer, S. B., Funtikov, A. I., Urlin, V. D., and Kolesnikova, A. N. // Soviet Physics JETP. 1962. V. 15. N. 3. P. 477 – 488.*
20. *Kresse, G., Furthmuller, J. // Computational Materials Science. 1996. V. 6. N. 1. P. 15 - 50.*
21. *Kresse, G., Furthmuller, J. // Physical. Reveiw B. 1996. V. 54. P. 11169-1 – 11169-18.*
22. *Gonze, X., Beuken, J. - M., Caracas, R., Detraux, F., Fuchs, M., Rignanese, G. – M., Sindic, L., Verstraete, M., Zerah, G., Jollet, F., Torrent, M., Roy, A., Mikami, M., Ghosez, Ph., Raty, J. – Y., Allan, D. C. // Computational Materials Science. 2002. V. 25. P. 478 – 492.*
23. *Elk is an all-electron full-potential linearised augmented-planewave (FP-LAPW) code released under either the GNU General Public License (GPL) or the GNU Lesser General Public License (LGPL). Elk code is available on <http://elk.sourceforge.net>*
24. *Dewaele, A., Loubeyre, P. and Mezouar, M. // Physical Review B. 2004. V. 70. P. 094112-1 - 094112-7.*
25. *Petrov, Yu. V., Migdal, K. P., Inogamov, N. A., and Zhakhovsky, V. V. // Appl. Phys. B. 2015. V. 119. No. 3. P. 401 - 411.*

26. *Hohlfeld, J, Mueller, J. G., Wellershoff, S.-S., and Matthias, E. // App. Phys. B. 1997. V. 64. No. 3. P. 387-390.*
27. *Gahagan, K. T., Moore, D. S., Funk, D. J., Rabie, R. L. Buelow, S. J. and Nicholson, J. W. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. P. 3205 - 3208.*
28. *Cho, B. I., Engelhorn, K., Correa, A. A., Ogitsu, T., Weber, C. P., Lee, H. J., Feng, J., Ni, P. A., Ping, Y., Nelson, A. J., Prendergast, D., Lee, R. W., Falcone, R.W., and Heimann, P. A. // Physical Review Letters. 2011. V. 106. P. 167601-1 – 167601-4.*