

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Мигдала Кирилла Петровича «Термодинамические и кинетические свойства металлов с возбуждённой электронной подсистемой» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Мигдала К.П. посвящена теоретическому изучению характеристик электронной подсистемы металлов при облучении фемтосекундными лазерными импульсами с плотностью энергии порядка порога абляции. Время установления равновесия между электронами и решеткой значительно больше времени установления равновесия внутри электронной подсистемы металла электронов. Это позволяет рассматривать электроны в металле как отдельную квазиравновесную подсистему, температура которой может быть сравнима с температурой Ферми. В течение того же времени плотность электронов и ионов не успевает измениться, оставаясь твердотельной. В силу неприменимости в этих условиях имеющихся подходов в направлениях физики идеальной или низкотемпературной плазмы решение данной задачи представляет несомненный научный интерес. **Актуальность** темы диссертации обуславливается возможными многочисленными применениями фемтосекундных лазерных импульсов для обработки металлов. **Новыми** научными результатами являются: построенная модель плотности электронных состояний, позволяющая выделить парциальный вклад валентных электронных зон и зон проводимости во внутреннюю энергию и давление при нагреве электронов; учёта влияния на термодинамические характеристики в предлагаемой модели изменения электронной структуры за счёт расщепления зон и наличия близких к валентным полустовных зон; определение границ механической устойчивости ряда металлов при электронном нагреве, проведённое в рамках метода функционала плотности. **Теоретическая значимость** диссертационной работы состоит в построении модели двухтемпературных характеристик вещества, определяемых электронной подсистемой, которая позволяет на основе известных данных по электронной структуре провести аналитические оценки. **Практическая значимость** результатов диссертационной работы определяется возможностью их применения как для расчётов в модели двухтемпературной гидродинамики, так и при построении уравнений состояния вещества в сильно неравновесных электрон-ионных состояниях. Результаты работы могут быть использованы для решения прикладных задач в следующих организациях: ИПМ им. М.В. Келдыша, ИПХФ РАН, ИФТТ РАН, ИАП РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина.

Диссертационная работа Мигдала К.П. содержит 238 страниц машинописного текста, 60 рисунков, 2 таблицы. Структура диссертации включает в себя введение, список использованных сокращений, пять глав, заключение, список 14 публикаций автора и список литературы, в котором имеется 253 наименования.

Во введении приведена общая постановка задачи, обоснованы актуальность, научная новизна, практическая значимость рассматриваемой проблемы. В ней описаны методы, с помощью которых проводилось исследование, обсуждается их достоверность. Сформулированы цели исследования и его основные результаты.

Первая глава является обзором литературы по взаимодействию фемтосекундных импульсов с веществом. В ней приведено описание основных методов применяемых при теоретическом изучении термодинамических и кинетических свойств «горячих» электронов в металлах. Заключительный раздел посвящён использованию метода функционала плотности.

Во второй главе описывается предложенная в работе двухпараболическая модель плотности электронных состояний металла. Приведены соотношения для термодинамических потенциалов электронного газа, показано согласие результатов этой модели с расчётами на основе метода функционала плотности. Отдельно рассмотрен случай тантала, электронная структура которого имеет особенности в виде расщепления 5d зоны по магнитному квантовому числу вблизи энергии Ферми, а также близкую к валентным 4f зону. Влияние этих эффектов на такие электронные термодинамические свойства, как химический потенциал, теплоемкость и вклад в давление за счёт электронного нагрева, рассмотрены в заключении данной главы.

В третьей главе рассмотрена задача о построении уравнения состояния вещества при электронном нагреве и изменениях объёма, возникающих после завершения двухтемпературной стадии за счёт волн ударного сжатия и разрежения. Исследовано поведение плотности электронных состояний в таких условиях. Обсуждается применимость модели разделения свободной энергии вещества на вклады холодного сжатия/растяжения, нагрева ионов и нагрева электронов.

В четвёртой главе осуществлён расчёт электронной теплопроводности и электрон-фононного теплообмена в металлах с горячими электронами, основанный на применении полуклассического приближения для электронов и использовании классического кинетического уравнения Больцмана. В приближении времени релаксации выведено выражение для электронной теплопроводности с учётом термоэлектрических эффектов, важных при температурах электронов порядка десятков тысяч кельвин и выше. Приведены соотношения для величины электрон-фононного теплообмена, обсуждается роль экранирования кулоновского взаимодействия электронов между собой и с ионами. Для алюминия, золота, меди и никеля приведено сравнение результатов с опубликованными данными экспериментов и расчётов с помощью других методов.

В пятой главе рассмотрено применение полученных автором результатов для численного моделирования методом двухтемпературной гидродинамики стадии установления электрон-ионного равновесия для никеля и меди, сравнения с экспериментом и сопоставления с ранее развитыми теоретическими подходами.

В заключении приводятся основные результаты диссертации, сформулированные в соответствии с выдвинутыми положениями.

По содержанию работы можно сделать следующие замечания:

- В разделе 3.1 приводятся результаты для построения двухпараболической модели нагретых электронов при сжатиях и растяжениях, происходящих уже после окончания двухтемпературной стадии. Эти результаты содержат зависимости для положения электронных зон и чисел их заполнения при электронных температурах несколько десятков тысяч кельвин. Следовало бы пояснить при каком физическом процессе могут быть востребованы эти данные, если учесть, что после установления равновесия температура электронов становится равной температуре ионов и составляет несколько тысяч кельвин.

- В подразделе 4.1.4 обсуждается использование экспериментальных данных и модели Друде для восстановления информации о частоте электрон-ионных столкновений в условиях, подразумевающих сохранение объёма. При этом не обсуждается ошибка, которая возникает вследствие того, что эксперименты по измерению электросопротивления в металлах проводятся при постоянном давлении, а не объёме. Следовало бы оценить, насколько велико влияние объёмного расширения металлов на используемые данные по электросопротивлению.

Приведённые замечания не снижают общей значимости работы. Представленная диссертация является законченным научным трудом, существенно расширяющим возможность теоретического описания взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с металлами на основе двухтемпературной модели.

Автореферат отражает содержание диссертации. Название диссертации адекватно воспроизводит суть работы. Содержание диссертации соответствует специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение. Считаю, что диссертация «Термодинамические и кинетические свойства металлов с возбуждённой электронной подсистемой» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Мигдал Кирилл Петрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник Сектора теории взаимодействия излучения с веществом ФГБУН «ФИАН им. П.Н. Лебедева», к.ф.-м.н. Канавин Андрей Павлович (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, тел. (49)132-6071, e-mail: kanavin@sci.lebedev.ru).

Доклад по материалам диссертационной работы "Характеристики электронной подсистемы металлов при релаксации субпикосекундного лазерного воздействия" - К.П. Мигдал (ОИВТ РАН, ВНИИА им. Н.Л. Духова) был заслушан и обсужден на научном семинаре «Физика импульсной высокотемпературной плазмы» Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук» 30.01.2018 г., что зафиксировано в протоколе №1-2018 от 30.01.2018.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук». 119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, (499)135-42-64, <http://www.lebedev.ru>, e-mail: postmaster@lebedev.ru

Официальный оппонент:

В.н.с. Физического института им. П.Н. Лебедева
кандидат физико-математических наук

А.П. Канавин

Подпись А.П. Канавина удостоверяю.

Ученый секретарь Физического института им. П.Н. Лебедева,
кандидат физико-математических наук

А.В. Колобов