

ОТЗЫВ

официального оппонента **Иногамов Наиль Алимовича**

на диссертационную работу **Фокина Владимира Борисовича**
«Континуально-атомистическая модель и ее применение для численного расчета воздействия одиночного и двойного фемтосекундного лазерного импульса на металлы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – *«Физика плазмы»*.

Диссертация Фокина Владимира Борисовича затрагивает круг задач, которые связаны с весьма актуальными проблемами. Речь идет о проблемах, которые возникают в физике взаимодействия лазерных импульсов с веществом. Наверно, не надо доказывать современность и востребованность этой проблематики. Хорошо известно, что импульсные лазеры широко применяются в роботизированных технологиях машиностроения, для создания функциональных поверхностей, в плазмонике и современной электронике. Превосходный обзор литературы дан в диссертации Владимира Борисовича Фокина. Обзор состоит из 6 глав, каждая из которых освещает ситуацию на сегодня в мире по отдельным подразделам проблемы. Таким образом, достигается стройное и логичное изложение.

Владимир Борисович открывает новое направление в физике взаимодействия лазер-вещество. Во-первых, он использует атомистический подход (молекулярная динамика - МД). Во-вторых, комбинирует МД с описанием двухтемпературных явлений в рамках модели сплошной среды. Эта комбинация названа в диссертации Владимира Борисовича именем ГиКАМ (гибридная континуально-атомистическая модель). В-третьих, диссертант систематически сравнивает результаты ГиКАМ с результатами гидродинамического моделирования, которое, кстати, выполняет сам (т.е. свободно владеет гидродинамическими методиками вместе с техникой МД моделирования). Главное же заключается в том, что детально на масштабах от атомного до мезоскопического проанализировано воздействие двойного лазерного импульса на мишень. Это сложная важная задача, особенностей которой я коснусь ниже.

Диссертационная работа состоит из 153 страниц печатного текста и включает список сокращений и обозначений, введение, обзор литературы, 3 главы, заключение, 3 приложения и список литературы, в который вошло 170 наименований литературных источников. В диссертации содержится 31

иллюстрация и 3 таблицы. Каждая глава завершается перечнем полученных в ней результатов и промежуточных выводов.

Во введении диссертационной работы обсуждается актуальность и научная новизна данной диссертационной работы. Сформулированы цели диссертационной работы, перечислены решенные в диссертации задачи, изложены положения, выносимые на защиту, приведен список основных публикаций по теме диссертации; представлены апробация, структура и объем диссертации.

В обзоре литературы анализируются основные теоретические и экспериментальные работы, касающиеся исследования воздействия ультракороткого лазерного импульса на вещество. В первой главе подробно описана гибридная континуально-атомистическая модель, приведено детальное описание этапов моделирования, обоснованы преимущества предлагаемой модели по сравнению с аналогичными моделями.

Во второй главе представлены результаты проверки МД кода. Рассматривается задача о воздействии одиночного лазерного импульса длительностью 100 фс на алюминиевую мишень. Результаты моделирования с применением гибридной континуально-атомистической модели, описанные в этой главе, сравниваются с расчетами других авторов, выполненными с применением одномерной двухтемпературной гидродинамической модели. Сравнения выполнены для ряда значений интенсивности падающего лазерного импульса. Завершается глава сравнением зависимости глубины абляции алюминия от интенсивности импульса с аналогичными зависимостями, полученными в эксперименте.

Основным результатом третьей главы является теоретический расчет уменьшения глубины абляции алюминия с ростом временного промежутка между двумя импульсами. Глава также начинается с описания постановки задачи – в отличие от задачи, описанной в предыдущей главе, производится моделирование воздействия двойного 100-фс лазерного импульса на алюминиевую мишень. Подробно рассмотрено поведение мишени под воздействием двойного импульса в случае различных промежутков времени между импульсами.

Важнейшее место в диссертации связано с анализом воздействия второго импульса на продукты абляции первым импульсом. Это весьма сложная задача. Подробно исследовано поглощение излучения второго импульса на продуктах разлета. Разогрев продуктов вторым импульсом приводит к их расширению. При этом происходит схлопывание разрывов плотности в парожидкостной смеси. Часть продуктов, первоначально (т.е. до воздействия вторым импульсом) летевших в направлении от мишени,

поворачивает назад, к мишени. Удар этой части по мишени приводит к формированию второй ударной волны в мишени и ее дополнительному разогреву.

В заключении диссертации приведен список наиболее важных выводов, обобщающих картину поведения алюминия под воздействием лазерного импульса.

Достоверность изложенных в диссертации результатов не вызывает сомнений. Во-первых, это следует из результатов подробных сравнений ГиКАМ с гидродинамическим моделированием самого диссертанта, см. вторую главу. Во-вторых, из сравнений с результатами других авторов. В-третьих, из тех сопоставлений, которые я выполнил самостоятельно. Дело в том, что оппонент много лет занимается исследованиями по близкой тематике. Но мы никогда не приступали к изучению оригинальной важной проблемы, связанной с воздействием пары импульсов.

Полученные данные и результаты, имеющие научно-практическую ценность, вынесены в Приложения. В Приложении А детально изложен алгоритм предлагаемой гибридной континуально-атомистической модели, а в Приложения Б–В вынесены полученные в диссертационной работе данные по глубине абляции в зависимости от параметров лазерного импульса.

Чрезвычайно ценными являются полученные в диссертационной работе сведения, относящиеся к сравнению широкодиапазонного уравнения состояния (ШУРС) алюминия и термодинамических данных, подсчитанных путем применения потенциала межатомного взаимодействия В.В. Жаховского (ЕАМ-потенциал), см. раздел 1.3. Сравнение фазовых диаграмм приведено на рисунках 1.1 и 1.2. Как следует из этих результатов ЕАМ-потенциал и ШУРС хорошо соответствуют друг другу.

В целом, диссертация написана хорошо, понятно, изложение материала последовательное и логичное. Работа превосходно иллюстрирована.

Результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых изданиях из перечня ВАК (4 зарубежных и 2 российских) и были представлены на российских и международных конференциях (всего опубликовано 29 тезисов докладов). Личный вклад автора в результаты, представлены в работе, не вызывает сомнений.

Замечание к диссертационной работе

Для проверки адекватности разработанной в диссертации модели автор работы применяет сравнения своих расчетов одноимпульсного воздействия и экспериментальных данных. Эти сравнения приведены на рисунке 2.7,

относящемся к подразделу 2.5. При этом привлекаются данные опытов Хашиды и др. 2001 года, ссылка 164.

В работе 164 измерения глубины кратеров выполнены следующим образом. Выполнялось большое количество лазерных выстрелов одинаковой интенсивности в одну точку. Пусть N – это число выстрелов. Промежутки между выстрелами велики, так что пятно нагрева полностью остывает от выстрела к выстрелу. Глубина кратера достигала микронной и более глубины H . За глубину кратера при одиночном выстреле принималась величина H/N . Именно эта величина, как функция падающего флюенса в одном выстреле, отложена на графике на рис. 2.7.

Однако коэффициент поглощения на чистой поверхности при первом выстреле не равен коэффициентам поглощения 2-го, 3-го и т.д. выстрелов в то же место. Причем изменения коэффициентов значительные. В настоящее время это хорошо установленный факт. Поэтому, на мой взгляд, не следует сравнивать мульти-импульсные результаты статьи 164 и результаты расчетов Владимира Борисовича. Особенно хорошо это видно по данным при малых флюенсах. При мульти-импульсном воздействии размывается порог абляции по флюенсу. Между тем при одноимпульсном воздействии имеет место резкий порог абляции.

По данным наших расчетов пороговое значение для алюминия составляет 50 нм по глубине кратера и 60 мДж/см² по поглощенному флюенсу. Ниже порога ни отрыва вещества от мишени, ни кратера нет.

На рис. 2.7 приводятся значения падающего флюенса. Рисунок намного выиграл бы, если по верхней горизонтальной оси была приведена величина поглощенного флюенса, который автор диссертационной работы вычисляет, но не приводит.

В ОИВТ РАН имеется превосходная лазерная лаборатория М.Б. Аграната. Там систематически проводятся лазерные эксперименты на интенсивностях и длительностях, рассматриваемых в работе Владимира Борисовича. Лаборатория хорошо оснащена, работают высококвалифицированные специалисты.

Почему Хашида и др. (ссылка 164) применяли многоимпульсную методику? Они просто не могли измерить малую глубину кратера (от 50 нм), формируемого одиночным воздействием. В лазерной лаборатории ОИВТ такие измерения выполняются легко. Более того, с помощью стробоскопических методик удастся не только измерять глубину кратера, но и следить за развитием ультрабыстрых процессов формирования кратера и лазерного факела на интервале времен от пико- до наносекунды.

Как раз такие картинки представлены в диссертации, см. рисунки 2.1, 2.3, 2.5 и 3.3-3.7, 3.9.

Оценка работы

Результаты работы представляют несомненный теоретический и практический интерес и, безусловно, будут использованы при постановке экспериментальных задач физики плазмы и лазеров. Указанное выше замечание никоим образом не снижает моей очень высокой оценки диссертации.

Диссертация Фокина В.Б. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

Автор диссертации, **Фокин Владимир Борисович**, по моему убеждению, бесспорно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Отзыв составил ведущий научный сотрудник сектора плазмы и лазеров ФГБУН Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, д.ф.-м.н. Иногамов Наиль Алимович.

142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А,

Официальный оппонент,

ведущий научный сотрудник сектора плазмы и лазеров

ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН,

д.ф.-м.н.

тел.: 8 (495) 702-93-17

e-mail: nailinogamov@gmail.com

<http://www.itp.ac.ru/ru/persons/inogamov-nail-alimovich/>

Подпись Иногамова Наиля Алимовича заверяю:

ученый секретарь ФГБУН ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН

к.х.н.



Иногамов Н.А.



Крашаков С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук
(ФГБУН ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН)
142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А
Тел.: +7 (495) 702-93-17
Факс: +7 (495) 702-93-17
Электронная почта: office@itp.ac.ru