

ОТЗЫВ

официального оппонента **Красюка Игоря Корнелиевича**

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».

Введение. Диссертация Фокина В.Б. посвящена созданию гибридной континуально-атомистической модели воздействия лазерного излучения на металл, моделированию абляции алюминия под воздействием одиночного и двойного фемтосекундного лазерного импульса с применением созданной модели, а также сравнению полученных результатов с другими подходами и экспериментальными данными.

Актуальность. Основными направлениями исследований с использованием лазеров, являются изучение фундаментальных явлений и поиск новых приложений для лазерной техники, при этом исследователи стремятся добиться снижения материальных и временных затрат на экспериментальные исследования. В настоящее время проводится большое число экспериментов, связанных с физикой экстремальных состояний вещества, с использованием фемтосекундного лазерного излучения. Актуальными являются задачи оптимизации лазерных установок для обработки (наноструктурирования) поверхностей, их очистки от примесей, сверления отверстий и узких каналов, получения наночастиц. Поэтому, теоретическое описание одно- и многоимпульсной абляции вызывает интерес у научного сообщества, однако завершенные модели, позволяющие описывать быстротекающие (субликосекундного диапазона) процессы на уровне отдельных атомов, к настоящему времени не построены, что и определяет актуальность диссертационной работы.

Новизна. Предлагаемая континуально-атомистическая модель позволяет моделировать: (а) воздействие лазерного излучения на металл, имеющий сложный профиль плотности, в широком диапазоне температур и давлений; (б) воздействие нескольких ультракоротких лазерных импульсов с различной частотой и поляризацией; (в) воздействие мощного импульса излучения, энергия которого многократно превышает порог абляции; (г) развитие процессов, протекающих при абляции, на атомарном уровне, без привлечения моделей термодинамических и транспортных свойств ионной подсистемы. Впервые, с применением гибридного подхода продемонстрированы следующие эффекты на примере алюминия: уменьшение глубины абляционного кратера при времени задержки между импульсами, превышающем 10 пс; экранирование мишени от второго импульса продуктами абляции первого импульса при времени задержки между импульсами, превышающем 50 пс; трехкратное увеличение электронной температуры плюма при времени задержки между импульсами 100–200 пс.

Диссертационная работа изложена на 153 страницах машинописного текста и состоит из списка сокращений и обозначений, введения, обзора литературы, 3-х глав, заключения, 3-х приложений и списка литературы, включающего 170 наименований. Диссертация содержит 31 рисунок и 3 таблицы.

Во введении диссертационной работы обсуждается актуальность и научная новизна данной диссертационной работы.

Обзор литературы содержит достаточно полный анализ подходов, используемых для моделирования воздействия фемтосекундных лазерных импульсов на металлы, и обзор экспериментальных результатов по изучению лазерной абляции и модификации металлов.

В первой главе автором была представлена континуально-атомистическая модель, объединяющая достоинства методов молекулярной

динамики и гидродинамики. За основу была взята модель Иванова–Жигилея, которая в ходе разработки была значительно усовершенствована.

Во второй главе с применением предложенной модели моделируется воздействие одиночного лазерного импульса с длиной волны излучения 800 нм и с длительностью 100 фс на алюминиевую мишень. Приводится сравнение профилей температуры и давления в мишени после прохождения импульса, рассчитанных с использованием предложенной модели и одномерной двухтемпературной гидродинамической модели, для различных значений интенсивности импульса. Также изучена зависимость глубины абляционного кратера от интенсивности импульса, и проведено сравнение этой зависимости с результатами других моделей и с экспериментальными данными.

В третьей главе приводится описание результатов моделирования воздействия двойного лазерного импульса на алюминиевую мишень посредством предложенной модели и обсуждается картина абляции алюминия в результате такого воздействия. Предлагаются механизмы подавления динамики абляции с ростом временного промежутка между импульсами. В частности установлено, что уменьшение глубины кратера, наблюдаемое в экспериментах, происходит в случае малых задержек (до 20 пс) из-за подавления фрагментации в волне разгрузки, вызванной первым импульсом, а в случае задержек ≥ 50 пс — из-за осаждения внутренних аблированных слоев ионов вещества обратно на мишень.

Выводы, сделанные автором, отражают основное содержание работы и кратко характеризуют полученные зависимости, а **приложения (А–В)** содержат важную информацию, пригодную для практического применения: полное описание параллельного алгоритма моделирования, посредством которого реализована предложенная модель, и в виде таблиц - зависимости глубины абляционного кратера алюминия от параметров лазерного импульса.

Замечания к диссертационной работе Фокина В.Б.

1. Было бы целесообразным, публикации по результатам диссертационной работы представить либо отдельным списком, либо выделить каким-либо способом в общем списке литературы.

2. На основе результатов численных расчетов, представленных в диссертации (глава 2), можно было бы построить зависимость давления в ударной волне от интенсивности лазерного излучения в диапазоне $(0.9 - 180) \text{ ТВт/см}^2$. Это представляет практический интерес при планировании и постановке экспериментов по воздействию фемтосекундного лазерного излучения на алюминиевые мишени.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают высокую оценку диссертации Фокина В.Б. в целом.

Все результаты, полученные в работе, являются **новыми** и опубликованы в виде 6 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК (из них 4 статьи – в высокорейтинговых зарубежных научных журналах). Основные результаты диссертации прошли **апробацию** на различных конференциях, семинарах и симпозиумах (всего опубликовано 29 тезисов докладов).

В целом, диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и содержит новые важные результаты, которые в полной мере отражены в публикациях. Оформление диссертации, описание используемого метода расчета, изложение полученных результатов и обсуждение их места среди достижений других исследователей выполнено в виде, доступным для их оценки широким кругом физиков. Этому способствует также и то, что детали расчетных кодов, важные для узкого круга специалистов, вынесены в приложения.

Достоверность полученных результатов **обоснована** путем их сравнения с экспериментальными данными и сравнением с выводами, полученными при использовании двухтемпературной гидродинамической модели, известной из литературы. Помимо этого в работе приведены значения расчетных

параметров и подробно описана методика расчетов, в связи с чем обоснованность выдвигаемых автором научных положений и выводов не вызывает сомнений.

Значимость. Результаты работы представляют несомненный теоретический и практический интерес и могут быть использованы при решении различных задач физики плазмы.

Тема диссертации соответствует указанной научной специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Автореферат правильно и в полной мере отражает содержание диссертации.

Диссертация Фокина В.Б. представляет собой завершенную научно-исследовательскую квалификационную работу и соответствует всем требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.

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

Отзыв составил заведующий отделом взаимодействия когерентного излучения с веществом ФГБУН Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. Красюк Игорь Корнелиевич.

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.: (499) 503-81-30, e-mail: krasyuk@kapella.gpi.ru.

Диссертация Фокина В.Б. и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании научного семинара отдела взаимодействия когерентного излучения с веществом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской

академии наук (руководитель семинара - член-корр. РАН, д.ф.-м.н.,
профессор Пашинин П.П.)

Официальный оппонент,

зав. отделом взаимодействия когерентного излучения с веществом

ИОФ им. А.М. Прохорова РАН,

д.ф.-м.н.

 Красюк И.К.

Подпись Красюка Игоря Корнелиевича заверяю:

ученый секретарь ФГБУН ИОФ им. А.М. Прохорова РАН,

д.ф.-м.н.

 Андреев С.Н.

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.: (499) 503-83-27, e-mail:
nauka@gpi.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ФГБУН ИОФ
им. А.М. Прохорова РАН), 119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, тел.: (499)
135-41-48, факс: (499) 135-02-70, e-mail: postmaster@kapella.gpi.ru