

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Институт общей
физики им. А. М. Прохорова
Российской академии наук

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН
Гарнов Сергей Владимирович

2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Кудряшова Сергея Ивановича
**«Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с
металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным
поглощением»,**
представленную на соискание ученой степени доктора физико–
математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Фемтосекундная лазерная абляция как взаимодействие интенсивных ультракоротких лазерных импульсов с поверхностью конденсированных материалов в абляционном режиме (плотность энергии – 0.1-10 Дж/см², плотность мощности – 1-100 ТВт/см²) является важным физическим явлением как в фундаментальном плане - для генерации высокоэнергетических состояний вещества и мощных ударных волн, так и в практических применениях – для высокопроизводительной прецизионной нано- и микромасштабной обработки различных материалов с более чем на порядок высокой (при прочих равных условиях) эффективностью удаления материала на единицу падающей энергии.

Сложная временная и пространственная динамика фемтосекундной лазерной абляции может быть условно разбита на последовательность основных стадий: поглощение энергии ультракороткого лазерного импульса накачки в результате нелинейной и неравновесной электронной динамики, определяющей также сами оптические свойства фотовозбужденного материала; перенос энергии из электронной подсистемы в решетку, нагревание и плавление последней, абляционное удаление материала и завершающая термическая релаксация. При этом, для этих основных стадий абляции существует ряд ключевых физических эффектов, которые качественно известны и теоретически

предсказаны, но до сих пор экспериментально не исследованы в количественном отношении. К ним относятся электронная и плазменная эмиссия, электрон-фононная релаксация и ее зависимость от уровня электронного возбуждения материала, откольная абляция, взрывная абляция (фазовый взрыв, фрагментация) с разлетом закритического флюида и исследования эффектов диссипативного и сверхупругого распространения в материалах мощных ударных волн). Кроме того, слабо изучены основные закономерности определяющей нелинейной и неравновесной стадии – поглощения энергии лазерного излучения – для различных (проводящих, полупроводящих) материалов с сильным межзонным поглощением при высоких интенсивностях ($10\text{-}100 \text{ ТВт}/\text{см}^2$) лазерного излучения. Распределение электронов по состояниям по итогам стадии одно- и многофотонного фотовозбуждения может существенно влиять на последующую стадию релаксации электронной подсистемы – на величины скорости термализации и средней частоты рассеяния электронов, коэффициента электронной теплопроводности и скорости переноса энергии в решетку, задавая общий нелинейный характер электронной динамики; в случае материалов с зонной щелью в абляционном режиме воздействия такую же роль играет ее сужение, зависящее от уровня фотовозбуждения (плотности электрон-дырочной плазмы) и само определяющее этот уровень. Таким образом, в отсутствие ясных представлений о каждой из основных стадий фемтосекундной лазерной абляции – в первую очередь, для материалов с сильным межзонным поглощением – целостная феноменологическая картина явления до сих пор отсутствует и для ее формирования требуются экспериментальные исследования закономерностей ключевых стадий с использованием новых подходов к методологии исследований, самим измерениям и интерпретации экспериментальных данных.

В диссертации Кудряшова Сергея Ивановича с целью формирования целостной феноменологической картины фемтосекундной лазерной абляции с помощью известных, а также разработанных автором оригинальных экспериментальных методик на примере материалов с сильным межзонным поглощением (металлов, полупроводников) последовательно исследуются основные закономерности ее ключевых стадий.

Диссертационная работа состоит из введения, семи содержательных глав, заключения и списка цитированной литературы из 336 наименований. Общий объем диссертации составляет 268 страниц, включая 129 рисунков и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и решаемые задачи, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены положения,

выносимые на защиту. Также, приведены сведения о апробации работы и личном вкладе автора.

Первая глава является обзором литературы. В ней последовательно качественно охарактеризованы основные стадии фемтосекундной лазерной абляции и описаны существующие, иногда противоречивые представления об их физической природе, отмечена необходимость исследований динамики абляции. В ходе описания динамики электронной подсистемы и оптических свойств фотовозбужденных металлов и полупроводников показана специфика их нелинейного и неравновесного взаимодействия с ультракороткими лазерными импульсами, длина волны которых попадает в спектральную область, где межзонное поглощение этих материалов доминирует над внутризонным и в результате лазерного воздействия резко и динамически изменяется концентрация свободных носителей. Обсуждается влияние данной специфики на последующие стадии абляции.

В второй главе приведены схемы экспериментальных установок и их описание, методики проведения экспериментов и измерений, указано использовавшееся в экспериментах оборудование и материалы.

В третьей главе представлены результаты измерений коэффициента отражения ультракоротких лазерных импульсов накачки или зондирования в зависимости от уровня фотовозбуждения металлов (алюминия, титана) в области их преобладающего межзонного поглощения. Продемонстрировано пороговое по плотности энергии накачки насыщение межзонного поглощения, приводящее к резкому росту температуры свободных электронов и эмиссии электрон-ионной плазмы.

В четвертой главе на примере фотовозбужденного теллура рассмотрены эффекты электронной и решеточной перенормировки ширины запрещенной зоны в зависимости от плотности электрон-дырочной плазмы, установлена количественная зависимость, согласующаяся с теоретическими расчетами. Далее эта зависимость используется для описания электронной и оптической динамики в других полупроводниках с достижением хорошего согласия. Отмечается влияние ширины запрещенной зоны на процесс оже-рекомбинации, насыщение плотности плазмы, начало ее нагревания и нелинейной по плотности энергии накачки эмиссии заряженных частиц (в согласии с результатами для металлов).

В пятой главе представлены разработанная методика измерения характерных времен электрон-фононной релаксации металлов и кремния по зависимостям пороговых плотностей энергии одноимпульсной абляции от длительности ультракоротких импульсов, результаты измерений и их обсуждение.

В шестой главе описаны разработанная рефлектометрическая методика регистрации высокодобротных акустических ревербераций в растущем слое расплава на поверхности полупроводников и результаты исследований параметров динамики их плавления в до- и абляционном режиме.

В седьмой главе рассмотрены основные механизмы фемтосекундной лазерной абляции – откольный и фрагментационный (фазовый взрыв). Для первого механизма исследованы характерные времена отрыва пленки расплава (существенно превышающие время его разгрузки) и ее скорости отлета, продемонстрирована характерная пенообразная топография дна откольного кратера, указывающие в совокупности на отрыв под действием давления в подповерхностной паровой полости. Для механизма фазового взрыва, выражающего во взрывном гидродинамическом разлете закритического флюида, с помощью разработанной бесконтактной ультразвуковой методики измерены характерные параметры разлета (давление, скорость), исследованы ранее теоретически предсказанные режимы диссипативного и сверхупругого ударно-волнового взаимодействия с металлами.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Достоинством диссертации является актуальность темы, высокая практическая и теоретическая значимость, высокий экспериментальный уровень выполненных исследований (в том числе – с помощью разработанных автором оригинальных методик), большой объем полученных экспериментальных данных, выстроенных в довольно целостную феноменологическую модель фемтосекундной лазерной абляции металлов и полупроводников с сильным межзонным поглощением. Новизна работы связана с экспериментальной демонстрацией эффектов межзонного поглощения в электронной и оптической динамике металлов и полупроводников, количественного определения зависимости перенормировки ширины запрещенной зоны от плотности электрон-дырочной плазмы в теллуре и применения для описания других полупроводников, разработкой новой методики и проведения измерений характерных времен электрон-фононной релаксации металлов и кремния, разработкой новой методики и проведения исследований плавления полупроводников, измерения характерных параметров откольного и фрагментационного механизмов абляции, экспериментальной верификацией «парового» механизма откола, демонстрацией разных режимов ударно-волнового взаимодействия с металлами.

Достоверность результатов не вызывает сомнений ввиду использованного сертифицированного оборудования, и их хорошей воспроизводимости. Результаты работы опубликованы в 52 научных статьях в рецензируемых

научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, и 2 монографиях.

Результаты, полученные в диссертации Кудряшова С.И., могут быть использованы в дальнейших фундаментальных исследованиях ФИАН, ИТФ РАН, ФГУП «ВНИИА», МФТИ, ИТМО и ряда других научных учреждений, а также различными научно-производственными предприятиями – для практического применения абляционной обработки и лазерного упрочнения ультракороткими лазерными импульсами.

Следует отметить некоторые недостатки, имеющиеся в работе:

1. Представляется неудачным название диссертационной работы. Термин «сильное межзонное поглощение» не характеризует материалы (металлы и полупроводники), исследованные в работе. Термин «сильное» является качественным и не отражает никакой специфики. Межзонное поглощение зависит от материала и длины волны лазерного излучения, но не зависит от его длительности. Другие качественные характеристики (такие как «мгновенный», «неравновесный», «сверхбыстрый» и. т.п.) также часто встречаются в тексте диссертации.

2. Вызывает возражение утверждение автора о том, что достоверность полученных им в работе экспериментальных результатов подтверждается качественными и в ряде случаев количественными совпадениями с результатами теоретического моделирования процесса фемтосекундной лазерной абляции. Скорее наоборот, экспериментальные результаты подтверждают адекватность теоретических моделей.

3. Экспериментальная возможность наблюдения динамических колец Ньютона при откольной абляции в ходе отлета пленки расплава, несмотря на имеющиеся публикации, в коллективе ведущей организации считается необоснованной.

4. Недостаточно полно изложена практическая значимость полученных результатов, не указаны конкретные области их применения.

Отмеченные недостатки, однако, не влияют на общую положительную оценку работы.

Тематика диссертационной работы соответствует специальности «Лазерная физика». Текст автoreферата правильно отражает ее содержание. Список цитируемой литературы соответствует содержанию.

Все вышесказанное дает основание считать, что представленная диссертация «Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным поглощением», представленная Кудряшовым С.И., является законченным научным исследованием, по своей тематике полностью соответствует

заявленной специальности и соответствует критериям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней, утвержденном постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., а автор работы Кудряшов Сергей Иванович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Доклад автора по материалам диссертации был представлен 18 сентября 2019 года на заседании Ученого Совета Научного центра волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (НЦВИ ИОФ РАН), протокол № 6. Отзыв на диссертацию был составлен главным научным сотрудником НЦВИ, д.ф.м.н. Шафеевым Георгием Айратовичем и одобрен на данном заседании Ученого Совета.

Главный научный сотрудник НЦВИ ИОФ РАН
доктор физико-математических наук

Шафеев Георгий Айратович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Института общей физики
им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН)
119991, Москва, ул. Вавилова, 38
телефон: +7 (499) 135-4148, e-mail: shafeev@kapella.gpi.ru

ВРИО директора НЦВИ ИОФ РАН,
кандидат физико-математических наук

Лымшев Михаил Леонидович

Подпись Шафеева Г.А. и Лымшева М.Л. заверяю.

И.о. учёного секретаря ИОФ РАН

доктор физико-математических наук

Глушков Владимир Витальевич



Список основных публикаций сотрудников Института общей физики РАН по теме диссертации Кудряшова С.И. в рецензируемых научных журналах за последние 5 лет:

1. Ushakov A. A. et al. Ring and unimodal angular-frequency distribution of THz emission from two-color femtosecond plasma spark //Optics express. – 2018. – Т. 26. – №. 14. – С. 18202-18213.
2. Kononenko T. V. et al. Influence of pulse repetition rate on percussion drilling of Ti-based alloy by picosecond laser pulses //Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Т. 103. – С. 65-70.
3. Kononenko T. V. et al. Effect of absorbing coating on ablation of diamond by IR laser pulses //Quantum Electronics. – 2018. – Т. 48. – №. 3. – С. 244.
4. Kononenko V. V., Konov V. I. Ablation of steel under surface irradiation by high-intensity tandem pulses //Quantum Electronics. – 2018. – Т. 48. – №. 1. – С. 40.
5. Kononenko V. V. et al. Nitrogen-vacancy defects in diamond produced by femtosecond laser nanoablation technique //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – №. 8. – С. 081101.
6. Kononenko V. V. et al. Excitation of an electronic subsystem of YAG crystal with femtosecond laser pulses //Laser Physics Letters. – 2017. – Т. 14. – №. 6. – С. 066002.
7. Ushakov A. A. et al. Backward terahertz radiation from a two-color femtosecond laser filament //JETP Letters. – 2017. – Т. 106. – №. 11. – С. 706-708.
8. Ashikkalieva K. K. et al. Direct observation of graphenic nanostructures inside femtosecond-laser modified diamond //Carbon. – 2016. – Т. 102. – С. 383-389.
9. Kononenko V. V., Zavedeev E. V., Gololobov V. M. The effect of light-induced plasma on propagation of intense fs laser radiation in c-Si //Applied Physics A. – 2016. – Т. 122. – №. 4. – С. 293.
10. Serkov A. A., Shafeev G. A., Barmina E.V. et al. Stainless steel surface wettability control via laser ablation in external electric field // Applied Physics A. - 2016. - V. 122. - № 12. - P. 1067.
11. Krasyuk I. K. et al. Study of extreme states of matter at high energy densities and high strain rates with powerful lasers //Laser Physics. – 2016. – Т. 26. – №. 9. – С. 094001.
12. Komlenok M. S. et al. Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation //Quantum Electronics. – 2015. – Т. 45. – №. 10. – С. 933.
13. Chizhov P., Bukin V., Garnov S. Interferometry in femtosecond laser plasma diagnostics //Physics Procedia. – 2015. – Т. 71. – С. 222-226.
14. Urusov A. E., Petrakova A. V., Kuzmin P. G. et al. Application of gold nanoparticles produced by laser ablation for immunochromatographic assay labeling // Analytical biochemistry. - 2015. - V. 491. - P. 65-71.