

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию 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

Взаимодействие интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов с металлами и полупроводниками исследуется уже более тридцати лет в связи с хорошо известными и вновь появляющимися практическими применениями. Однако, вследствие сложного, мульти-стадийного характера такого взаимодействия, развивающегося на множественных временных и пространственных масштабах, его физическая картина исследована неполно для случая материалов с сильным межзонным поглощением, предполагающим на стадии электронной динамики в течении возбуждающего фемтосекундного лазерного импульса интенсивную фотоинжекцию свободных носителей и сопутствующие мгновенные изменения оптических свойств материалов. В частности, баланс различных процессов нелинейной электронной динамики в таких системах с переменной концентрацией свободных носителей достигается в результате конкуренции нелинейного фотовозбуждения, ферми-экранирования, оже-рекомбинации, динамического изменения заселенностей зон и самого зонного спектра и поэтому важно представлять количественное соотношение основных вкладов, что до сих пор не было достигнуто. Поскольку такая нелинейная электронная динамика является начальной стадией, определяющей через величину и динамику объемной плотности вложенной энергии весь ход последующей лазерной абляции, детальная феноменологическая картина всего явления до сих пор не сложилась. Соответственно, последовательные и детальные экспериментальные исследования основных стадий фемтосекундной лазерной

абляции для создания ее адекватной и работоспособной феноменологической картины представляются в высокой степени **актуальными**.

Исследования с применением новых подходов к рассмотрению ранее слабоизученных сторон основных стадий фемтосекундной лазерной абляции – электронной и оптической динамики, электрон-фононного взаимодействия, плавления, ударных волн и абляционного массопереноса – представлены в диссертационной работе Кудряшова Сергея Ивановича, где они дополняются также остаточно исчерпывающим анализом полученных результатов. Эти исследования **впервые** в полной мере охватывают основные стадии фемтосекундной лазерной абляции материалов с сильным межзонным поглощением и позволяют обоснованно выстроить сбалансированную феноменологическую картину явления.

Диссертационная работа содержит список литературы из 336 наименований и включает в себя введение, семь глав и заключение, изложенные на 271 странице.

Во введении представлены актуальность темы диссертационной работы, ее цели и решаемые задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, выносимые на защиту положения, сведения об аprobации работы и личном вкладе автора.

**Первая глава** дает обзор литературы применительно к фемтосекундной лазерной абляции как важному фундаментальному явлению и практической технологии микро-обработки материалов. Отдельно упоминаются особенности материалов с сильным межзонным поглощением, выражющиеся в изменяющейся плотности свободных носителей.

**Вторая глава** представляет обозрудование, экспериментальные схемы и методики проведения измерений, а также использованные материалы.

**Третья и четвертая главы** описывают результаты время-разрешенных оптических и зарядо-эмиссионных исследований сверхбыстрой электронной динамики поверхности металлов (алюминий, титан) и полупроводников (теллур, арсенид галлия, кремний) для условий сильного межзонного поглощения

возбуждающих фемтосекундных лазерных импульсов. Данные исследования показывают, что в области низких плотностей энергии фемтосекундных лазерных импульсов доминирует линейное или нелинейное межзонное поглощение излучения накачки с минимальным нагревом электронной подсистемы и слабой термоэлектронной эмиссией, тогда как насыщение межзонного поглощения из-за опустошения/населения зон (металлы) или стабилизация плотности электрон-дырочной плазмы и связанной с ней безынерционной, линейной по плотности плазмы и изотропной по пространству перенормировки ширины запрещенной зоны благодаря усиленной перенормировкой скоростью оже-рекомбинации (полупроводники) приводит к резкому ускорению роста электронной температуры и нелинейной эмиссии плазмы заряженных частиц. Данная стадия чрезвычайно важна для всей последующей абляционной динамики, а также процессов плазмонной динамики в металлических и сильно-возбужденных диэлектрическихnanoструктурах, в том числе – для их лазерного nanostructurirovaniya.

**Пятая глава** представляет стадию релаксации электронной подсистемы металлов и полупроводников путем переноса энергии свободных носителей в решетку, причем в случае полупроводников – еще и с учетом предшествующей оже-рекомбинации. Для этой стадии Кудряшовым С.И. разработана, обоснована и апробирована новая методика, позволяющая оценить характерные времена электрон-фононной термализации по положению минимума пороговой плотности энергии для одноимпульсной абляции в зависимости от длительности возбуждающих лазерных импульсов (0.2-20 пс). Впервые установлена для аморфного кремния величина коэффициента амбиполярной диффузии плотной электрон-дырочной плазмы ( $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ).

**В главе 6** приводятся результаты динамических измерений положения фронта плавления поверхностного слоя материалов (в том числе – с учетом эффекта абляции) с помощью разработанной С.И. Кудряшовым уникальной методики, регистрирующей акустическую модуляцию коэффициента отражения

пробного излучения. В результате, впервые экспериментально установлен факт движения фронта плавления с облученной поверхности, измерены максимальные скорости его движения и глубины проплавления в зависимости от плотности энергии, а также оценена продольная скорость звука в расплаве графита.

**Седьмая глава** описывает результаты измерения базовых параметров (характерные глубины и топографии кратеров, температуры, давления и скорости разлета вещества) фемтосекундной лазерной абляции, позволяющие идентифицировать их фундаментальные механизмы. Для откольной абляции впервые экспериментально подтверждено теоретическое предсказание об отрыве пленки расплава в результате формирования подповерхностной паровой или пенной полости при слиянии множественных нанопузырей под действием высокого парового давления, стабилизировавшего эти нанопузыри против сил поверхностного натяжения. Для механизма фазового взрыва («фрагментации») непрозрачного и сильно-рассеивающего закритического флюида при высоких плотностях энергии методами времязадержкой микроскопии отражения и бесконтактной широкополосной ультразвуковой диагностики подтвержден его гидродинамический разлет и измерены начальные скорости, а также давления разлета в зависимости от плотности энергии лазерного излучения. Впервые экспериментально продемонстрированы сверхэластический режим распространения ударной волны в мишени титана при давлениях выше 10 ГПа и высоко-диссипативный режим ее распространения при давлениях ниже 10 ГПа, сопровождающийся, в том числе, структурной трансформацией поверхностного слоя титана и возникновением остаточных напряжений.

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы.

**Новизна.** В ходе экспериментальных исследований Куряшовым С.И. впервые был предложен и разработан ряд новых методов: 1) исследование оптического отражения с временным разрешением, с регистрацией реверберации акустических волн, что позволило а) однозначно опровергнуть модель УКИ гомогенного плавления полупроводников; б) впервые обнаружить эффект образования отделенной тонкой пленки расплава полупроводника; 2)

бесконтактной широкополосной ультразвуковой диагностики волн давления в воздухе, позволившей измерить начальные давления закритического флюида мегабарного уровня и оценить скорости его расширения. Кудряшовым С.И. впервые был экспериментально обнаружен сверхэластичный режим распространения ударных волн в титане для давлений выше 10ГПа. Впервые экспериментально установлено, что откольная абляция поверхностного слоя расплава под действием УКИ наблюдается после его акустической разгрузки, с субнаносекундными задержками (Al, Si, GaAs, ВОПГ). В проведенных экспериментах и основанных на них расчётах Кудряшовым С.И. впервые была показана перенормировка зонного спектра кристаллического теллура до уровня 50% (без схлопывания зонной щели), самоограничиваемая сильно растущей Оже рекомбинацией. В совокупности, проведенные исследования складываются в новую, целостную и последовательную картину сверхбыстрых физических и физико-химических процессов в ходе фемтосекундной лазерной абляции.

**Практическое значение.** Развитые фундаментальные физические представления об абляции полупроводников и металлов под действием единичных и серии УКИ поляризованного лазерного излучения сформировали целостную картину комплекса взаимосвязанных нелинейных процессов и явлений в существенно неравновесных системах «конденсированная среда - лазерное излучение». Эти представления могут быть практически использованы для оптимизации различных видов режимов лазерной обработки материалов поляризованным ультракороткими лазерными импульсами, включая лазерное упрочнение металлов и сплавов, селекции и оптимизации режимов самоупорядоченного формирования микро- и нано-структур различных типов на поверхностях металлов и полупроводников, просветление поверхностей и создание поверхностей «черных» металлов, фемтосекундное лазерное легирование полупроводников. Найденные времена электрон-фононной релаксации будут использованы в разрабатываемых режимах наноструктурирования поверхностей серий сдвоенных и строенных импульсов для оптимизации расстояния между импульсами. Возможна разработка способов

и устройств генерации ультракороткими лазерными импульсами пучков релятивистских электронов, разработка ультрабыстрых затворов.

Разработанные автором методики могут быть использованы: 1) для создания аппаратуры ультрамикроанализа поверхностей с использованием фемтосекундных лазерных импульсов, на глубину в несколько нм (с отбором ультрамальных количеств веществ); 2) акусто-модуляционная рефлексометрическая методика с временным разрешением – в прикладных и фундаментальных исследованиях идентификации плавления поверхностного слоя и динамического измерения глубины плавления под действием фемтосекундных лазерных импульсов; 3) методика широкополосной ультразвуковой диагностики ударных волн (УВ) в воздухе – для исследования распространения и взаимодействия сверхмощной УВ с материалами, бесконтактной диагностики режимов упрочнения УВ и их контроля.

Выдвинутые автором диссертационной работы на защиту научные положения представляются **обоснованными** результатами проведенных исследований и их анализом. Основные результаты представляются **достоверными**, широко представлены и апробированы на международных конференциях (25 приглашенных и устных докладов), опубликованы в 54 печатных работах.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний:

1. Диссертация написана понятным языком, без особых стилистических погрешностей. Однако, часто встречаются слова с пропусками букв или двойными буквами, с заменой букв, разрывы слов.
2. В главе 3 автором была экспериментально изучена эмиссия электронов с поверхности металлов в режимах воздействия фемтосекундных лазерных импульсов ниже порога образования отлетающего плазменного слоя. Результаты экспериментов выявили линейную зависимость выхода электронов от плотности энергии излучения, что свидетельствует о классической однофотонности фотоэлектрического эффекта. Автор цитирует публикации по гибридному

механизму Фаулера – дюБриджа, экспериментально наблюдавшемуся для ряда металлов. Кроме того, известна нелинейная многофотонная эмиссии электронов с остройных наноструктур, осуществлявшаяся под действием фемтосекундных лазерных импульсов. Поскольку автором использовались не атомно гладкие поверхности металлов, в (наборе) спектре их микро/nanoшероховатостей вероятно наличие наноостройных структур. Однако анализ возможной роли многофотонной ионизации в фотоэлектронной эмиссии отсутствует.

3. В абляционном режиме «отлетающего плазменного слоя» экспериментальное изучение эмиссии электронов на металлах и полупроводниках позволило обнаружить наклон кривых зависимости выхода электронов от плотности энергии фемтосекундных лазерных импульсов, приблизительно кратно отличающийся для различных использованных металлов и полупроводников. Однако, эти интересные экспериментальные результаты автором не комментируются.

4. При рассмотрении процессов, происходящих при ультрабыстром вложении энергии фемтосекундных лазерных импульсов излучения в бинарный полупроводник GaAs отсутствует учет и анализ вклада его разложения на разупорядочение поверхности, дальнейшую эмиссию летучей компоненты и связанных с этим процессов, включая возможную аморфизацию, в том числе влияющих на энергетический баланс.

5. На стр.71 диссертации, 3-я строка сверху. Указывается Рис.3.3, а нужно Рис. 3.4. На стр. 58 на рис.2.13 приведены несколько кривых, но не указано, чем они отличаются.

Вместе с тем, данные замечания не являются принципиальными и не снижают общей положительной оценки диссертации.

Автореферат диссертационной работы достоверно отражает ее содержание.

Диссертационная работа Кудряшова Сергея Ивановича «Взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов в режиме абляции с металлами и полупроводниками, обладающими сильным межзонным поглощением» полностью **удовлетворяет всем требованиям** «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации

№ 842 от 24 сентября 2013 года, а её автор – Кудряшов Сергей Иванович – заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник сектора 303, филиала акционерного общества «Корпорация космических систем специального назначения «Комета» - «Научно проектный Центр оптоэлектронных Комплексов наблюдения».

Макин Владимир Сергеевич

 «25» сентября 2019 г.

Почтовый адрес: **Филиал АО «Корпорация «Комета» - «НПЦ ОЭКН»**

Г. Санкт-Петербург, 194021, Шателена ул., д.7, Email: [komet@eooss.ru](mailto:komet@eooss.ru)

Телефон: +7(81369)68669, моб. тел +79217993751,

Email: [vladimir.s.makin@gmail.com](mailto:vladimir.s.makin@gmail.com); [makinvs@niiioep.ru](mailto:makinvs@niiioep.ru)

Подпись ведущего научного сотрудника доктора физ.-мат. наук Макина  
Владимира Сергеевича удостоверяю

Специалист по кадрам



*Сор Т.Ю.*  
ФИО

*26.09.2019*

Список основных публикаций В.С. Макина по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1.Makin, V.S., Pestov, Y.I., Makin, R.S.** Formation of Kerr waveguide and microgratings on a germanium surface under the action of femtosecond radiation of the mid-IR range, Optics and Spectroscopy (English translation of Optika i Spektroskopiya) 123(2), c. 289-293 (2017)
- 2.Makin, V.S., Pestov, Y.I., Makin, R.S.** Abnormal spatial nanogratings formation by long pulse laser radiation on condensed matter surfaces, Proceedings of the International Conference Days on Diffraction, DD 2016 7756861, c. 298-303 (2016)
- 3.Makin, V.S., Pestov, Y.I., Makin, R.S.** Surface nanogratings of abnormal orientation in universal polariton model of laser-induced damage of condensed media Journal of Physics: Conference Series, 737(1),012014 (2016)
- 4.Makin, V.S., Pestov, Y.I., Makin, R.S.** Efficient material treatment by axis-symmetrically polarized laser radiation Journal of Physics: Conference Series, 737(1),012024 (2016)
- 5.Makin, V.S., Logacheva, E.I., Makin, R.S.** Localized surface plasmon polaritons and nonlinear overcoming of the diffraction optical limit, Optics and Spectroscopy (English translation of Optika i Spektroskopiya) 120(4), c. 610-614 (2016)
- 6.Makin, V.S., Logacheva, E.I., Makin, R.S.** Origin of anomalous nanostructures formation under linear polarized femtosecond laser irradiation of condensed matter, Proceedings of the International Conference Days on Diffraction 2015, DD 7354860, c. 201-207 (2015)
- 7.Макин В.С., Макин Р.С.** Универсальный характер разрушения конденсированной среды мощным терагерцовыми излучением и критерий Аббе. XXIX международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине». Сборник научных трудов под редакцией В.А. Петрова. Т.29. С. 160-165. Москва. 2018.
- 8.Makin V. S.** Control the Metal Grain Boundary Recrystallization Evolution by the Laser Radiation Electric Field Strength Direction Under Cyclic Thermal Loading, Study of Grain Boundary Character, Prof. Tomasz Tański (Ed.), InTech, (2017) DOI: 10.5772/66248.
- 9.Makin, V. S., Makin, R. S.** Nanogratings Formation in a System of Ultra-short Laser Pulses–Metalloorganic Gas–Deposited Metal–Sapphire in Sinergetic Interference Field with Waveguide Modes Participation. *KnE Energy*, 3(3), 116-121 (2018).