

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им.П.Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Кудряшов Сергей Иванович

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В РЕЖИМЕ АБЛЯЦИИ С МЕТАЛЛАМИ И ПОЛУПРОВОДНИКАМИ,
ОБЛАДАЮЩИМИ СИЛЬНЫМ МЕЖЗОННЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный консультант: доктор физико-математических наук, профессор **Ионин Андрей Алексеевич**

Официальные оппоненты:

Чекалин Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт спектроскопии Российской академии наук (г. Троицк), и.о. заведующего лабораторией ультрабыстрых процессов

Головань Леонид Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, профессор

Макин Владимир Сергеевич, доктор физико-математических наук, АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения» (г. Сосновый бор), ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук

Защита диссертации состоится «14» октября 2019 года в 11:00 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.023.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФИАН (www.lebedev.ru)

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С момента появления в начале 80-х годов лабораторных лазеров с синхронизацией мод [1], генерирующих ультракороткие – фемтосекундные, субпикосекундные и пикосекундные (<10 пс) – лазерные импульсы (УКИ), с их помощью были исследованы многие фундаментальные явления в области взаимодействия лазерного излучения с материалами, предполагающие сверхбыстрое вложение энергии с высокой пиковой мощностью, и в том числе – абляция фемтосекундными лазерными импульсами (фемтосекундная лазерная абляция, ФЛА) [2,3]. С тех пор и, в особенности, с выпуском первых коммерческих лазеров в конце 90-х годов, ФЛА как взаимодействие интенсивных УКИ с поверхностью конденсированных материалов в абляционном режиме (плотность энергии – $0.1-10$ Дж/см², плотность мощности – $1-100$ ТВт/см²) активно исследовалась как важное физическое явление в фундаментальном плане (для генерации высокоэнергетических состояний вещества [4], мощных ударных волн (УВ) [5]) и в практических применениях – для высокопроизводительной прецизионной нано- и микромасштабной обработки различных материалов [6], включая диэлектрики, с помощью лазеров УКИ с высокой частотой повторения (до нескольких ГГц) [7]. В частности, в единственной работе [7] для УКИ ($0.1-10$ пс) по сравнению с короткими (КИ) – субнаносекундными и более длинными – лазерными импульсами была показана на порядок величины более высокая (при прочих равных условиях) эффективность удаления металлов на единицу падающей энергии.

Принципиальной особенностью характеристик УКИ в плане обработки материалов является высокая пиковая мощность при невысокой энергии импульсов, что позволяет осуществлять нелинейную электромагнитно-силовую модификацию оптических характеристик материалов на временах возбуждения электронной подсистемы (в масштабе УКИ) – например, превращать диэлектрик в проводник [8]. Этим же начальным нелинейным воздействием запускается цепь неравновесных (релаксационных) электронных и решеточных процессов с динамикой, предопределенной объемной плотностью вложенной энергии, на которую излучение уже напрямую не влияет – поглощение энергии лазерного излучения происходит без влияния абляционного лазерного факела, в отличие от случая КИ. В результате, инициирование и длительность ФЛА определяются временными масштабами внутренних элементарных стадий данного явления, а не продолжительностью лазерного импульса, как в случае КИ, и может последо-

вательно изучаться на разных временных масштабах с помощью схем «возбуждение-зондирование» с фемтосекундным временным разрешением как традиционная модуляционная спектроскопия с электронной, термической, акустической и фазово-структурной модуляцией оптических свойств возбужденного вещества.

Сложная мультимасштабная временная и пространственная динамика ФЛА может быть условно разбита на последовательность основных стадий: 1) поглощение энергии УКИ в результате нелинейной и неравновесной электронной динамики, определяющей также сами оптические свойства фотовозбужденного материала; 2) перенос энергии из электронной подсистемы в решетку, 3,4) нагревание и плавление последней, 5) абляционное удаление материала и завершающая термическая релаксация. В последнее десятилетие было показано [9,10], что для самых важных, задающих стадий ФЛА – стадий 1 и 2 – электронная динамика значительно усложняется для металлов со сложной структурой зон (например, для целого класса переходных металлов с зонами d-электронов – основных структурных компонентов конструкционных материалов и материалов плазмонных элементов нанофотоники) в силу возможности, наряду с оптическими, термически-индуцированных межзонных переходов. В результате, основные характеристики электронной подсистемы – электронная теплоемкость, теплопроводность и константа электрон-фононной связи – оказываются для разных металлов разнообразными (в том числе – немонотонными) функциями электронной температуры в зависимости от положения уровня Ферми относительно потолка зон d-электронов с многократно более высокой плотностью состояний. При этом, в работах [9,10] предполагается термализованная электронная подсистема с внутризонным откликом свободных электронов и невозмущенным вкладом резонансных межзонных переходов (приближение низких лазерных интенсивностей), что характерно, скорее, для эволюции электронной подсистемы существенно позже окончания УКИ накачки и термализации электронной подсистемы. В этом отношении, существует определенная аналогия с описанием оптического отклика полуметаллов, полупроводников и диэлектриков, где обычно также рассматривают внутризонный отклик фотовозбужденных электронов в зоне проводимости (в валентной зоне – дырок) и невозмущенный вклад от резонансных межзонных переходов [11] (иногда качественно демонстрируется [12] или только гипотетически упоминается [13] возможность его насыщения при высоких интенсивностях УКИ накачки материала). Вместе с тем, сопутствующая оптическая динамика в переходных металлах с сильным межзонным поглощением (по критерию величины мнимой части линейной компоненты диэлектрической

проницаемости – межзонный вклад много больше внутризонного) под действием возбуждающих УКИ до сих пор изучалась только при относительно низких интенсивностях (менее 1 ТВт/см^2) в режимах линейного [14,15] и нелинейного поглощения [16]. В частности, оптическая динамика переходных металлов под действием УКИ в абляционном режиме рассматривалась до сих пор без учета возможного насыщения межзонного поглощения [3-7,11,17], несмотря на многократную – практически на порядок величины – разницу в плотности электронных состояний их s,p- и d-зон, предполагающую возможность такого насыщения не только для линейного, но и многофотонного поглощения за счет интенсивной фотоинжекции электронов из d- в s,p-зоны и заселения соответствующих энергетических состояний с невысокой плотностью, а также, как и для полуметаллов, полупроводников и диэлектриков, сопутствующую интенсивную Оже-рекомбинацию d-дырок [18,19]. Кроме того, в качестве важного качественного отличия оптического отклика полуметаллов, полупроводников и диэлектриков – материалов с зонной щелью – при высоких уровнях электронного возбуждения может проявиться теоретически предсказанная возможность сильной электронной перенормировки зонного спектра этих материалов (в частности – сужения зонной щели до 50% от исходной величины) [20], впрочем, до сих пор однозначно и количественно не подтвержденная экспериментально. Таким образом, основные закономерности определяющей нелинейной и неравновесной стадии ФЛА – поглощения энергии УКИ – для различных (проводящих, полупроводящих) материалов с сильным межзонным поглощением при соответствующих высоких интенсивностях УКИ ($10\text{-}100 \text{ ТВт/см}^2$) и уровнях электронного возбуждения до сих пор не установлены. 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 УКИ такую же роль играет ее сужение, зависящее от уровня фотовозбуждения (плотности электрон-дырочной плазмы, ЭДП) и само определяющее этот уровень.

Для других вышеупомянутых основных стадий ФЛА также существует ряд ключевых физических эффектов, которые в общем смысле качественно известны и теоретически предсказаны, но до сих пор экспериментально не исследова-

ны в количественном отношении и потому их вклад, динамика или диапазон действия не установлены:

- а) электронная и плазменная эмиссия в масштабе УКИ,
- б) электрон-фононная релаксация – в плане изменения ее параметров в зависимости от уровня электронного возбуждения материала,
- в) плавление материалов – в плане определения механизмов (гомогенный или гетерогенный) и параметров (скорости, глубины),
- г) откольная абляция – в плане определения механизмов (механический отрыв, гомогенное вскипание или их комбинация) и параметров,
- д) взрывная абляция (фазовый взрыв, фрагментация) с разлетом закритического флюида – в плане измерения величин внутреннего давления флюида на поверхности материалов в зависимости от плотности энергии УКИ, экспериментального наблюдения и исследования эффектов диссипативного и сверхупругого распространения в материалах мощных ударных волн, индуцированных УКИ.

Таким образом, в отсутствие ясных представлений о каждой из основных стадий ФЛА – 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.

Соответственно, **целью работы** являлось экспериментальное обоснование целостной феноменологической мультистадийной картины нелинейного и неравновесного взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с поверхностью материалов с сильным межзонным поглощением – металлов и полупроводников – в абляционном режиме.

Для формирования целостной феноменологической картины ФЛА было необходимым установить путем экспериментальных исследований основные закономерности ключевых стадий ФЛА материалов с сильным межзонным поглощением под действием УКИ в видимой/ближней ИК-области в результате решения следующих задач:

1. Исследование нелинейной, неравновесной динамики оптических характеристик и электронной подсистемы металлов и полупроводников с выявлением эффектов насыщения межзонных переходов, оже-рекомбинации и перенормировки зонного спектра, электронной и ионной эмиссии, транспорта энергии (теплопроводность, амбиполярная диффузия);

2. Идентификация процессов и определение параметров неравновесной электрон-фононная релаксации и нагревания металлов и полупроводников в абляционном режиме;
3. Идентификация и определение параметров неравновесного плавления полупроводников;
4. Идентификация механизмов и определение параметров неравновесной откольной и взрывной сверхкритической (фрагментационной) абляции металлов и полупроводников.

Научная новизна работы

В работе получены следующие новые научные результаты, определяющие основные закономерности ключевых стадий ФЛА под действием УКИ в видимой/ближней ИК-области для металлов и полупроводников с сильным межзонным поглощением и формирующие ее целостную феноменологическую картину:

1. При фотовозбуждении ЭДП теллура с плотностью $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ запрещенная зона безынерционно, линейно и изотропно сужается, что соответствует «красному» сдвигу спектра оптических постоянных материала;
2. Изменения коэффициента отражения кремния и арсенида галлия в масштабе УКИ накачки при фотовозбуждении ЭДП с плотностью $< 10^{22} \text{ см}^{-3}$ хорошо описываются с учетом безынерционной и сильной (до 50%) электронной перенормировки ширины запрещенной зоны, тогда как соответствующая решеточная перенормировка (до 50%) развивается на субпикосекундных временах. Электронная перенормировка зонной щели нелинейно увеличивает коэффициент оже-рекомбинации;
3. Для абляционного режима воздействия на металлы (алюминий, титан) и полупроводники (кремний, графит) существует корреляция по плотности энергии УКИ между началом сильного нагревания ($\sim 1 \text{ эВ}$) электронного газа (после насыщения межзонных переходов) и началом сверхбыстрой эмиссии электронной плазмы через механизм заряжения поверхности;
4. Пороговые плотности энергии одноимпульсной абляции различных металлов (алюминий, медь, железо, серебро) имеют минимум при длительности УКИ в диапазоне 1-3 пс, что соответствует характерным временам переноса энергии из электронной в ионную подсистему практически на порядок быстрее предсказаний теории и в результате существенно обостряет температурные градиенты в поверхностном слое и увеличивает диссипацию вложенной энергии;

5. Выше пороговой плотности энергии УКИ для плавления полупроводников (кремния, арсенида галлия, графита) наблюдается квазипериодическая модуляция коэффициента отражения из-за высокочастотных ревербераций акустической волны в расплаве с существенно отличным акустическим импедансом. Временные зависимости периода модуляции (времени обхода звуковой волной слоя расплава) указывают на распространение в мишени фронта плавления в пикосекундном масштабе времени, позволяют измерить мгновенные и максимальные толщины расплава в зависимости от плотности энергии УКИ;
6. В доабляционном режиме толщина слоя расплава кремния, арсенида галлия и графита ограничивается положением определенной изотермы плавления материала (в случае кремния на 20% превышающей равновесную температуру плавления), в абляционном режиме – отрывом части слоя расплава;
7. На аблируемой УКИ поверхности алюминия и титана измерены давления мегабарного уровня, указывающие на сверхзвуковой гидродинамический разлет слабоионизованного закритического флюида с характерными пикосекундными временами, определяющимися плотностью энергии УКИ. На примере алюминия оценена температура ионной подсистемы на момент начала взрывной абляции, соответствующая известной критической температуре материала, на примере титана экспериментально продемонстрированы диссипативный и сверхупругий режимы пробега волны высокого давления в мишени;
8. Откольная абляция поверхностного слоя расплава нанометровой толщины для алюминия, кремния, арсенида галлия и графита происходит после его акустической релаксации в результате субнаносекундного наномасштабного подповерхностного гомогенного вскипания, пенообразования и образования паровой полости в термически-расширенном расплаве с субнаносекундными задержками, определяющимися плотностью энергии УКИ.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработана экспериментальная методика регистрации электронной и ионной эмиссии в абляционном режиме воздействия УКИ в воздухе, расширяющая возможности электронно- и плазма-эмиссионных измерений в область высоких токов и соответствующих плотностей энергии УКИ накачки (от единиц мДж/см² для вакуумных экспериментов – до единиц Дж/см²). Низкопороговый выход плазмы, коррелирующий с выходом положительных ионов и возбужденных нейтралов в абляционном факеле, в сочетании с оптико-эмиссионной спектро-

скопией представляет интерес для лазерного ультрамикроанализа поверхностей (на глубину в несколько нм) с отбором ультрамалых количеств вещества;

2. Данная сверхбыстрая низкопороговая лазерно-плазменная абляция имеет хорошие перспективы для ультрапрецизионной ФЛА поверхностей материалов, в том числе – для их многоимпульсного наноструктурирования в режиме формирования периодических поверхностных структур с целью контроля поверхностных характеристик, определяющих течение процессов трения, вскипания, электронной эмиссии, смачивания и развития микробиологических культур;

3. Измеренные характерные времена электрон-фононной релаксации и термализации полупроводников и металлов в режиме ФЛА являются справочными данными для разработки технологических режимов обработки материалов под действием УКИ и ее теоретического моделирования;

4. Разработана термо-модуляционная рефлектометрическая методика с временным разрешением для измерения тепловой деформации и температуры поверхностного слоя материалов, представляющая широкий интерес для фундаментальных и прикладных исследований процессов обработки материалов;

5. Разработана акусто-модуляционная рефлектометрическая методика с временным разрешением для динамической идентификации плавления поверхностного слоя материалов и динамического измерения глубины плавления, представляющая широкий интерес для фундаментальных и прикладных исследований процессов обработки материалов. Измеренные скорости распространения фронта плавления в разных материалах являются реперными значениями для оценок параметров плавления в ходе ФЛА и его теоретического моделирования;

6. Разработана методика широкополосной ультразвуковой диагностики УВ в воздухе при абляции поверхности материалов УКИ, позволяющая установить для различных материалов начальные давления и скорости расширения абляционного факела в воздухе в зависимости от параметров ФЛА и связать их с параметрами выходных волн давления на тыльной стороне мишени – для исследования распространения и взаимодействия сверхмощных УВ с материалами, характеристиками УВ-упрочненного поверхностного слоя материалов, а также далее использовать эту методику для бесконтактной количественной диагностики этих явлений в конденсированной фазе или контроля режимов ее обработки УКИ.

7. В совокупности, предлагаемая целостная феноменологическая картина ФЛА является основой для разработки перспективных режимов лазерной обработки поверхности материалов и теоретических моделей взаимодействия УКИ с материалами с сильным межзонным поглощением в абляционном режиме.

Положения, выносимые на защиту

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены основные закономерности ключевых стадий ФЛА под действием УКИ в видимой/ближней ИК-области для материалов с сильным межзонным поглощением, формирующие целостную феноменологическую мультистадийную картину нелинейного и неравновесного взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с поверхностью материалов с сильным межзонным поглощением – металлов и полупроводников – в абляционном режиме, и сформулированы положения, выносимые на защиту:

1. Насыщение исходно преобладающего межзонного поглощения в алюминии и титане при их возбуждении УКИ ближнего ИК-диапазона длительностью ≈ 100 фс в абляционном режиме приводит к резкому усилению нагрева электронной подсистемы металлов за счет внутризонных переходов и сопровождается нелинейной по плотности энергии излучения эмиссией электрон-ионной плазмы. Для полупроводников (теллура, кремния, арсенида галлия) такое межзонное возбуждение приводит к частичной (до 50%) электронной перенормировке ширины запрещенной зоны в масштабе лазерного импульса (при ее аналогичной субпикосекундной решеточной перенормировке) и соответствующему увеличению коэффициента и скорости нелинейной оже-рекомбинации, что резко замедляет рост плотности электрон-дырочной плазмы в пользу ее нагрева и эмиссии электрон-ионной плазмы, нелинейной по плотности энергии излучения;
2. В отсутствие маскирующего эффекта многофотонного поглощения пороговые плотности энергии одноимпульсной абляции металлов (железо, алюминий, медь, серебро), а также аморфного кремния при воздействии УКИ накачки варьируемой длительности имеют минимум зависимости при различных длительностях импульса в диапазоне 0.6-3 пс, соответствующих для этих материалов характерному времени переноса энергии из электронной в ионную подсистему;
3. Неравновесное плавление полупроводников (кремний, арсенид галлия, графит) в абляционном режиме воздействия УКИ происходит в пикосекундном масштабе времени в результате распространения фронта плавления от поверхности материала и останавливается при достижении границы с определенной изотермой порога фазового превращения. В ходе этого процесса абляция слоя расплава уменьшает его толщину с формированием откольного кратера фиксированной глубины;

4. При умеренных (<1 Дж/см²) плотностях энергии УКИ длительностью ≈ 100 фс откольная абляция-отрыв поверхностного слоя расплава металлов (алюминий) и полупроводников (кремний, арсенид галлия, графит) происходит уже после его акустической релаксации в результате подповерхностного гомогенного вскипания и пенообразования в термически-расширенном расплаве с характерными субнаносекундными задержками и скоростями отлета слоя, определяющимися поверхностной плотностью энергии УКИ;

5. При высоких (>1 Дж/см²) плотностях энергии УКИ длительностью ≈ 100 фс фрагментационная абляция (иначе называемая «фазовый взрыв») металлов (алюминий, титан) происходит путем сверхзвукового гидродинамического разлета закритического флюида при давлениях, достигающих мегабарного уровня, с характерными пикосекундными временами, определяющимися плотностью энергии УКИ.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе экспериментальных результатов обеспечивается тщательной отработкой экспериментальных методик и использованием современного аттестованного научно-исследовательского оборудования, обеспечивающего необходимую чувствительность и точность измерений, их воспроизводимостью и согласием с выводами теоретических моделей.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались автором на международных и российских научных конференциях: International Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science CLEO/QELS (USA-2000, 2005), International Conference on Non-resonant Laser-Matter Interactions NLMI'10 (Russia, 2000), International Conference on Coherent and Non-Linear Optics and Laser Assisted Technologies ICONO/LAT (Belorussia-2001, 2007, Russia-2010, 2013), High Power Laser Ablation (USA-2002, 2004, 2006, 2010, 2012), Boulder Damage Symposium (USA-2004,2005), Photonics West (USA, 2005, 2006, 2009), International Conference on Photoexcited Processes and Applications ICPEPA-V,XI (USA-2006, Lithuania-2018), Международный научный семинар «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах» LPpM3-V,VII (Россия, 2008, 2010), International Conference on Laser Optics (Russia, 2008), International Conference on Modern Problems of Laser Physics MPLP-5 (Novosibirsk, 2008), III-я Всероссийская конференция «Взаимодействие высококонцентрированных

потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, 2009), International conference “Lasers and Laser Information Technologies” ILLA (Bulgaria-2009, Россия-2014), Indo-Russian Symposium on Nanotechnology and Plasma Physics IRNANO-2009 (India, 2009), International Symposium Photonics-Europe 2010 (Belgium, 2010), International Conference on Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies FLAMN (Russia, 2010, 2013, 2016), 10-ой Международная конференция «Модификация материалов пучками частиц и потоками плазмы» (Россия, 2010), International conference on Advanced Laser Technologies ALT (Bulgaria-2011, France-2014), International Symposium on Laser Precision Microfabrication LPM (USA-2012, Lithuania-2014, China-2016), International symposium on Progress In Electromagnetic Research PIERS (Malaysia-2012, Sweden-2013, Czech Republic, 2015), VII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики» ФПО (Россия, 2014), CECAM (Ireland, 2015), ASCO-NANOMAT (Россия, 2015), International Conference METANANO-2017 (Россия, 2017), International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2017 (Россия, 2017,2018), International Conference on Photonics and Applications ICPA (Vietnam-2016,2018), где было сделано 25 приглашенных и устных докладов по различным аспектам диссертационной работы.

Результаты, представленные в диссертационной работе, также неоднократно докладывались автором на семинарах Отделений квантовой радиофизики, оптики и физики твердого тела ФИАН, Института общей физики РАН, университета Информационных технологий, механики и оптики и Белгородского государственного университета.

Публикация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 54 печатных работах (из них – две главы в монографиях и 52 работы в научных реферируемых журналах, индексируемых в наукометрической базе данных Web of Science, стр. 34), а также в 25 публикациях по докладам на международных конференциях (стр. 40).

Личный вклад автора

В ходе получения результатов диссертационной работы автор лично осуществлял постановку задач исследований, планировал и разрабатывал экспериментальные схемы и протоколы измерений, участвовал в планировании, подготовке и выполнении экспериментов, обработке экспериментальных данных, вы-

полнял интерпретацию результатов и проводил их обсуждение с сотрудниками ФИАН и других организаций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи основных глав и заключения. Работа содержит 271 страницу печатного текста, 129 рисунков и 3 таблицы. Библиография включает 336 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи диссертационной работы, сформулирована научная новизна, показана практическая значимость работы и представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе обзорного плана на примере предшествующих экспериментальных и теоретических исследований последовательно рассматривается сложная неравновесная, мультимасштабная и мультистадийная природа ФЛА, начиная от нелинейного поглощения энергии УКИ и развития электронной динамики, переноса энергии из электронной подсистемы в решетку, нагрева и плавления последней, до абляционного удаления материала. Для этих основных стадий указывается ряд ключевых физических эффектов, которые качественно известны и теоретически предсказаны, но до сих пор экспериментально не исследованы в количественном отношении и потому их вклад, динамика или диапазон действия не установлены.

Во второй главе «Экспериментальное оборудование, схемы и материалы» описываются использованные в работе лазерные источники УКИ, приводятся разработанные оптические схемы для рефлектометрических измерений с временным разрешением в схеме «возбуждение-зондирование», измерительные схемы для электрических коллекторных, оптико-эмиссионных и ультразвуковых исследований, а также связанные с ними методики измерений, интерпретации и обработки сигналов. Кратко охарактеризована сертифицированная аналитическая аппаратура – сканирующий электронный микроскоп для изучения нано- и микромасштабного рельефа поверхности с модулем для энерго-дисперсионного рентгено-флуоресцентного спектрального химического микроанализа.

В третьей и четвертой главах рассматриваются вопросы сверхбыстрой нелинейной электронной динамики и связанной с ней сверхбыстрой динамики

линейной оптической компоненты диэлектрической проницаемости поверхности сильно-фотовозбужденных полупроводников и полуметаллов, а также переходных металлов с сильным межзонным поглощением (МЗП), исследуемых с помощью модуляционных время-разрешенных методов рефлектометрии УКИ накачки или слабых пробных УКИ, а также электрической коллекторной методики сбора эмиттированных заряженных частиц.

Сначала, в **третьей главе** «Электронная динамика и сверхбыстрые изменения оптических свойств фотовозбужденных металлов с сильным межзонным поглощением» рассмотрены вопросы сверхбыстрой электронной динамики и связанной с ней сверхбыстрой динамики модуляции линейной оптической компоненты диэлектрической проницаемости непосредственно в течение УКИ накачки на поверхностях металлов с сильным МЗП, представляющих наиболее сложный случай и в значительной степени имитирующих поведение сильно-фотовозбужденных полупроводников и полуметаллов, отличающихся, тем не менее, также сильными динамическими изменениями зонного спектра. Данная стадия является одной из важнейших, поскольку определяет начальную объемную плотность вложенной энергии УКИ в материалах и соответствующие механизмы ее релаксации, приводящие в итоге к различным механизмам абляции. Для наиболее полного исследования основных процессов оптической и электронной динамики впервые в мире используется комплекс взаимодополняющих время-разрешенных методов измерения отражения самих УКИ накачки («само-отражения») и слабых пробных УКИ, задержанных по отношению к УКИ накачки, а также коллекторной методики сбора эмиттированных заряженных частиц, проявляющихся совместно как модуляция оптических свойств и свойств электронной подсистемы, коррелированная по F с эмиссией заряженных частиц. Это позволило, с одной стороны, оценить временные масштабы эмиссии заряженных частиц, а с другой стороны – объяснить некоторые особенности модуляции оптических свойств интенсивной эмиссией таких частиц. Исследования описаны в порядке усложнения и преемственности, начиная с металлов с их более простой динамикой и относительно слабо меняющейся плотностью носителей, в том числе – алюминия с простой структурой зонного спектра и МЗП в только узкой ближней ИК-области (раздел 3.1), а также титана с со сложной структурой зонного спектра и ярко выраженными МЗП во всем видимом и УФ диапазонах (раздел 3.2). В частности, сочетание методов самотражения УКИ накачки с эмиссионными исследованиями выхода заряженных частиц для поверхности алюминия и титана показало, что в области низких поверхностных

плотностей энергии УКИ накачки в оптическом отклике материала доминирует МЗП с минимальным нагревом электронного газа (Рис.1, слева), а эмиссия электронов происходит по линейному закону (Рис.1, справа). Напротив, в области высоких значений поверхностной плотности энергии УКИ накачки на фоне насыщения МЗП оптический отклик материала определяется нагреванием электронного газа, который коррелирует с выходом плазмы материала, нелинейным по F , согласно модели Фаулера-дью Бриджа для многофотонных процессов. Сверхбыстрый характер эмиссии плазмы подтверждается существенными потерями вложенной энергии на такую эмиссию в течении УКИ накачки и корреляцией с внутриимпульсной динамикой нагрева электронного газа после насыщения МЗП, а также наличием сильной ионной компоненты в спектрах оптической эмиссии факела при плотностях энергии УКИ накачки многократно ниже порога термической абляции материала с разлетом закритического флюида.

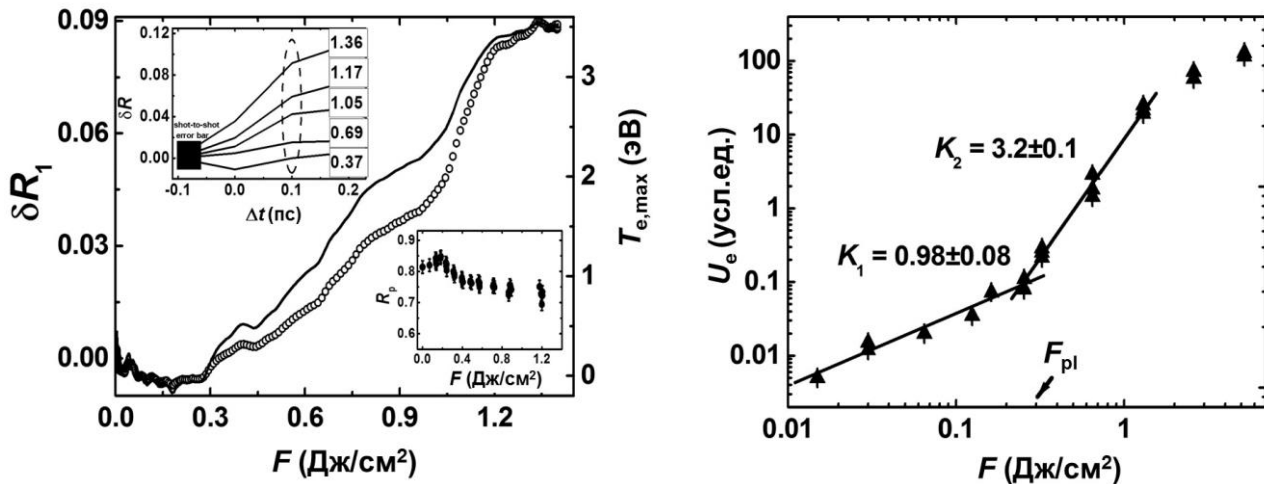


Рис. 1. (слева) Коэффициент дифференциального отражения δR_1 на момент окончания УКИ ($\Delta t = 0.1$ пс) (светлые круги) и рассчитанная максимальная электронная температура $T_{e,max}$ (сплошная кривая) как функция F . Верхняя вставка: динамика $\delta R(\Delta t)$ для различных значений F (в рамках) с погрешностью измерения (темный квадрат). Нижняя вставка: зависимость коэффициента самоотражения УКИ накачки $R_p(F)$, использованная для расчета величины поглощенной плотности энергии. (справа) Зависимость выхода электронной эмиссии U_e от F в двойных логарифмических координатах при потенциале коллектора +300 В и ее линейная аппроксимация с угловыми наклонами $K_{1,2}$ в области низких и высоких значений F – выше и ниже порога выхода плазмы F_{pl} .

Далее, в главе 4 «Электронная динамика и сверхбыстрые изменения оптических свойств фотовозбужденных полупроводников с сильным межзонным по-

глощением» продолжается рассмотрение сверхбыстрой электронной динамики и связанной с ней сверхбыстрой динамики модуляции линейной оптической компоненты диэлектрической проницаемости на поверхностях полуметаллов и полупроводников с еще более сложными особенностями динамики – в частности, принципиальным изменением на много порядков плотности носителей и связанного с этим значительного сужения зонной щели в режиме ФЛА в течение УКИ накачки. Это задает положительную обратную связь для процессов фотовозбуждения, нелинейно ускоряющих рост плотности носителей и величину сверхбыстрой электронной перенормировки зонного спектра. Впервые в мире используется комплекс взаимодополняющих время-разрешенных методов измерения отражения самих УКИ накачки и слабых пробных УКИ, задержанных по отношению к УКИ накачки, а также коллекторной методики сбора эмиттированных заряженных частиц. Это позволяет, с одной стороны, проанализировать временные масштабы и механизмы эмиссии заряженных частиц, а с другой стороны, объяснить особенности модуляции оптических свойств их корреляцией по плотности энергии УКИ с эмиссией заряженных частиц.

Сначала, в разделе 4.1 по данным выполненным в Гарвардском университете измерений время-разрешенного «обычного» и «необычного» коэффициента отражения полуметаллического теллура для условий его сильного фотовозбуждения под действием УКИ автором диссертационной работы были впервые установлены вклады (примерно по 50%) и линейные зависимости электронной и когерентной фононной перенормировки (сужения) ширины запрещенной зоны от плотности электрон-дырочной плазмы (ЭДП) (Рис. 2), задающие нелинейную положительную обратную связь при фотогенерации носителей за счет увеличения скоростей оптических переходов, ударной и туннельной ионизации. Оценены величины диагональных и недиагональных элементов оптического потенциала деформации материала, определяющие динамику суб-пикосекундной решеточной перенормировки зонной щели, связанной с когерентными центрозонными оптическими фононами A_1 -симметрии, а также их «электронное» размягчение и потенциальный кратковременный переход в новую кристаллическую фазу.

Установленный для условий сильного фотовозбуждения полуметаллического теллура под действием УКИ вклад электронной перенормировки – сужения ширины запрещенной зоны $\approx 50\%$, согласующийся с имеющимися теоретическими предсказаниями [20], для полуметаллов, полупроводников и диэлектриков в условиях фотовозбуждения УКИ является очень существенным и задает нелинейную положительную обратную связь при фотогенерации носителей за счет

увеличения скоростей фотопроцессов, ударной и туннельной ионизации. В связи с этим, предполагалось согласованное драматическое ускорение фотоионизации полупроводников и полуметаллов под действием УКИ с одновременным электронным коллапсом запрещенной зоны [21] («сингулярность фотоионизации»).

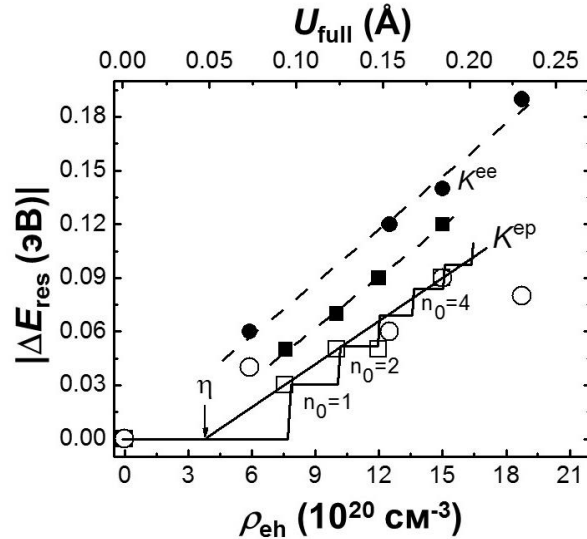


Рис. 2. Сдвиги резонансов поглощения $|\Delta E_{\text{res,ext}}^{\text{ee}}|$ (темные квадраты), $|\Delta E_{\text{res,ord}}^{\text{ee}}|$ (темные круги), $|\Delta E_{\text{res,ext}}^{\text{qs}}|$ (светлые квадраты) и $|\Delta E_{\text{res,ord}}^{\text{qs}}|$ (светлые круги) в зависимости от ρ_{eh} (нижняя ось) и амплитуды фонона U_{full} (верхняя ось). Прямые линии представляют аппроксимацию $|\Delta E_{\text{res,ext}}^{\text{ee}}|$ и $|\Delta E_{\text{res,ord}}^{\text{ee}}|$ с наклонами K^{ee} (пунктирные линии), а ступенчатая зависимость аппроксимирует величины $\Delta E_{\text{res},k} \approx A(U_{\text{full}})$ с учетом квантования амплитуды фонона U_{full} с осредняющим угловым наклоном K^{ep} (сплошная линия).

Примечательно, что нелинейный процесс трех-частичной оже-рекомбинации не может ограничить предполагаемое ускорение фотоионизации по всем указанным механизмам (с их разными вкладами для УКИ с несущей частотой в разных спектральных диапазонах), поскольку будет уравновешен обратным процессом ударной ионизации. Поэтому в настоящей работе данный гипотетический режим «сингулярности фотоионизации» был изучен экспериментально и теоретически в плане сверхбыстрой электронной динамики и динамики ширины запрещенной зоны для арсенида галлия – материала с гораздо более существенной шириной запрещенной зоны и более простой структурой зонного спектра (раздел 4.2). Наряду с резким увеличением фотогенерации носителей при сужении ширины запрещенной зоны, которое может приводить к дополнительному сужению ширины запрещенной зоны и так далее – вплоть до ее коллапса с дальнейшим лавинообразным нарастанием плотности ЭДП [21], был впервые эксперименталь-

но обнаружен сильный компенсационный нелинейный эффект увеличения коэффициента Оже-рекомбинации с уменьшением ширины запрещенной зоны арсенида галлия и кремния по мере роста плотности ЭДП в интервале $\rho_{eh} \sim 10^{21}-10^{22}$ см⁻³ в течение УКИ накачки, стабилизирующий плотность на уровне $\sim 10^{22}$ см⁻³. При этом, помимо самого высокоскоростного нелинейного (трехчастичного) процесса Оже-рекомбинации в плотной ЭДП, генерирующего горячие носители, при сужении ширины запрещенной зоны E_g^* нелинейно возрастает величина его коэффициента $\gamma_a(\rho_{eh}) \propto \gamma_{a,0} \times [E_{g,0}/E_g^*(\rho_{eh})]^4$, что стабилизирует плотность ЭДП и ограничивает связанную с ней электронную перенормировку ширины запрещенной зоны, что теретически предсказывалось в [20].

С учетом всех известных и впервые установленных эффектов – электронного экранирования ионного потенциала, зонной дисперсии масс электронов, электронной перенормировки зонной щели, характерного времени релаксации электронов (в приближении случайных фаз) с учетом энергии фотонов УКИ и электронной температуры, а также насыщения поглощения была уточнена и апробирована феноменологическая модель описания сверхбыстрой электронно-модуляционной динамики линейной оптической компоненты диэлектрической проницаемости сильно-фотовозбужденных полупроводников и полуметаллов на базе вкладов межзонных (ϵ_{IB}) и внутризонных переходов (вклад Друде) [13]. В межзонаном поглощении учитывались эффекты электронной перенормировки зонной щели и насыщения поглощения, во внутризонном – возбуждения ЭДП, электронного экранирования ионного потенциала с высокочастотной диэлектрической постоянной ϵ_{hf} , зонной дисперсии оптической массы электрон-дырочных пар m_{opt} , характерного времени релаксации электронов τ_e [13,22]:

$$\epsilon^*(\omega, \rho_{eh}) = \epsilon_{IB}(\omega^*) \left(1 - \frac{\rho_{eh}}{\rho_{bf}}\right) - \frac{\omega_{pl}^2(\rho_{eh})}{\omega^2 + \frac{1}{\tau_e(\rho_{eh})^2}} \left(1 - \frac{i}{\omega\tau_e(\rho_{eh})}\right), \quad (1)$$

$$\omega_{pl}^2(\rho_{eh}) = \frac{\rho_{eh} e^2}{\epsilon_0 \epsilon_{hf}(\rho_{eh}) m_{opt}^*(\rho_{eh})}, \quad (2)$$

$$\tau_e = \left(\frac{128 E_F^2}{\pi^2 \sqrt{3} \omega_{pl}} \right) \frac{1 + \exp\left[-\hbar\omega/k_B T_e\right]}{(\pi k_B T_e)^2 + (\hbar\omega)^2}, \quad (3)$$

где ω^* – частота пробного излучения с учетом перенормировки зонного спектра, ω_{pl} – плазменная частота, E_F – энергия Ферми, k_B – постоянная Больцмана, $\hbar$ – постоянная Планка. Это позволило для ряда материалов – кремния, арсенида галлия – из данных измерений само-отражения УКИ накачки или отражения за-

держанных пробных УКИ в зависимости от плотности энергии УКИ накачки (Рис.3) определить с гораздо более высокой точностью соответствующие плотности ЭДП, однозначно указывающие – в виде соответствующих сублинейных зависимостей – на стабилизацию ее динамики благодаря Оже-рекомбинации.

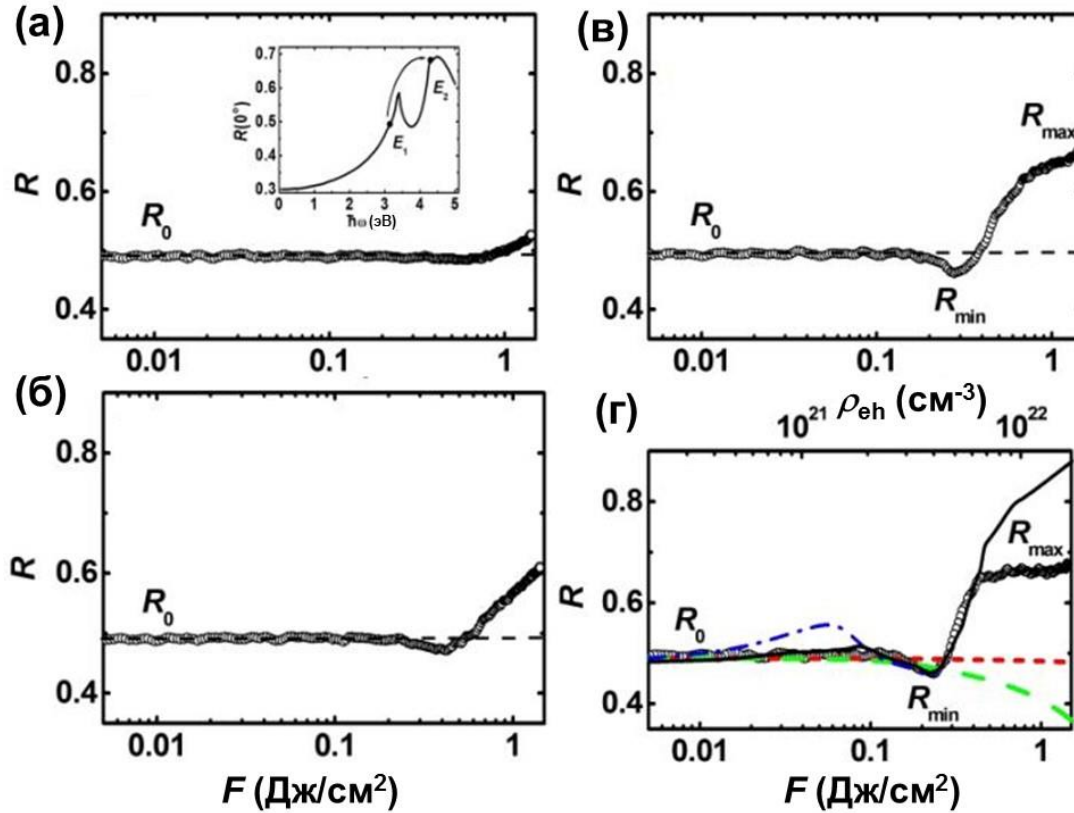


Рис. 3. Зависимости коэффициента отражения пробных УФ-УКИ $R(F)$ (светлые кружки, левая и нижняя оси) при задержках $\Delta t = -0.1$ пс (а), 0 пс (б), $+0.1$ пс (в) и $+0.2$ пс (г). На рисунке (г) красная пунктирная, зеленая штриховая, синяя штрих-пунктирная и темная сплошная кривые $R(\rho_{eh})$ (левая и верхняя оси) представляют 1) «чистую» модель Друде, 2) модель Друде с плазменной экранировкой, 3) модель Друде с плазменной экранировкой и перенормировкой, 4) модель Друде с плазменной экранировкой, перенормировкой и заполнением зон. Вставка: спектр отражения невозбужденного кремния при нормальном падении, где стрелки показывают ЭДП-индуцированный переход из невозбужденного состояния (начальная точка при 3.1 эВ с отражением R_0) в конечное состояние при 4.3 эВ, отвечающее R_{max} , тогда как R_{min} представляет отражение в минимуме.

Так, в разделе 4.3 для кремния подъем R до 0.67 - 0.68 на Рис.3г связывается с плазменной перенормировкой зонной щели и соответствующим «красным» сдвигом спектра отражения невозбужденного кремния в область плато полосы E_2 (вставка $R(\hbar\omega)$ на Рис. 3а). При этом, поскольку максимальная величина элект-

тронной перенормировки ограничена 50% (т.е., ≤ 1.7 эВ), эффективная величина зондирующего фотона с учетом «красного» сдвига может достигать 4.8 эВ – как раз в начале плато. Дальнейший рост ρ_{eh} в зависимости от F приводит к меньшей перенормировке щели (в согласии с результатами [20]) и росту вклада Друде.

Результаты аппроксимации экспериментальной зависимости на рис. 3г показывают взаимосвязь между величинами ρ_{eh} и F в области, включающей спад и рост коэффициента отражения пробных УФ-УКИ. Соотношение этих параметров $\rho_{eh}(F)$ обнаруживает сублинейный характер $\propto F^{0.77 \pm 0.01}$ (Рис. 4, слева), кото-

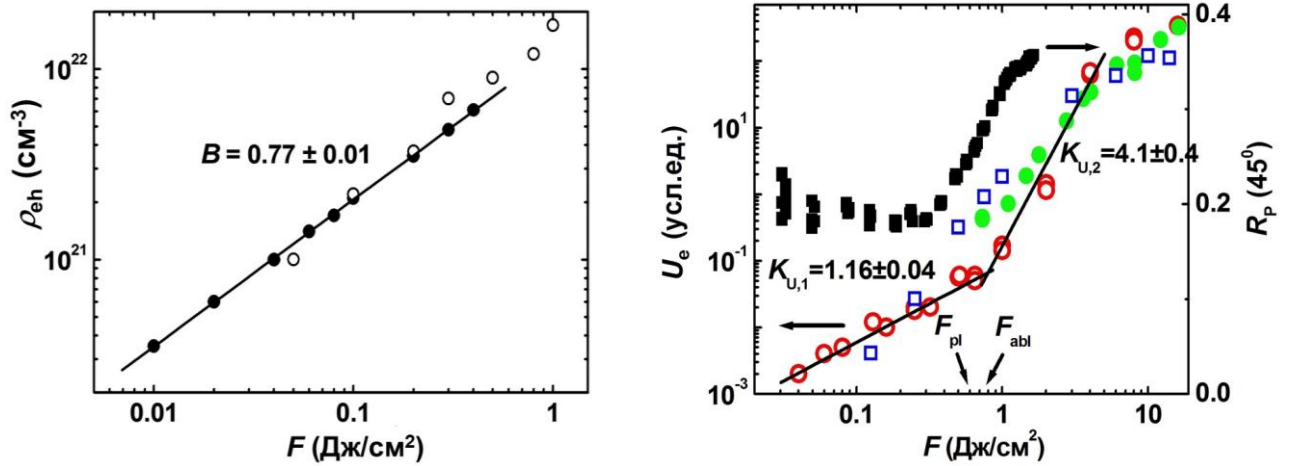


Рис. 4. (слева) Зависимость $\rho_{eh}(F)$, полученная из аппроксимации экспериментальной кривой на Рис. 3г (темные круги) и путем численного расчета (светлые круги), с угловым наклоном в двойных логарифмических координатах $B = 0.77 \pm 0.01$. (справа) Зависимости сигналов электронной (полые красные кружки), ионной (зеленые кружки) и атомной (полые синие квадраты, SiI 288 нм) эмиссии кремния $U_e(F)$ в двойных логарифмических координатах с линейной аппроксимацией первой зависимости с угловыми наклонами $K_{U,1,2}$; (правая ось) зависимость коэффициента отражения кремния $R_p(45^\circ)$ от F (темные квадраты). Вертикальные стрелки – пороги плазмо-образования F_{pl} и одноимпульсной термической абляции кремния $F_{abl} \approx 0.75$ Дж/см².

рый можно объяснить в рамках кинетической модели динамики ЭДП

$$\frac{\partial \rho_{eh}}{\partial t} \approx G(I(t)) - \gamma(\rho_{eh}) \rho_{eh}^3, \quad (4)$$

где первое слагаемое в правой части представляет фотоионизацию материала, а второе слагаемое учитывает нелинейный лимитирующий эффект оже-рекомбинации (коэффициент рекомбинации γ нелинейно зависит от ρ_{eh} , сильно возрастаая при $\rho_{eh} \sim \rho_{bgr}$), тогда как амбиполярная диффузия ЭДП в объеме крем-

ния несущественна в течение УКИ накачки длительностью ~ 100 фс на глубинах вложения энергии излучения $> 10^{-5}$ см. Обнаруживается, во-первых, стационарный режим сильного фотовозбуждения с образованием плотной ЭДП ($\rho_{\text{eh}} > 10^{21}$ см $^{-3}$), формирующейся в результате баланса фотоионизации и рекомбинации в виде $G(I(t)) \approx \gamma(\rho_{\text{eh}})\rho_{\text{eh}}^3$. Такой баланс дает соотношение $\rho_{\text{eh}} \propto F^{2/3}$ при умеренных величинах $\rho_{\text{eh}} < \rho_{\text{bgr}}$ в случае двухфотонного возбуждения кремния, которое преобладает при генерации его ЭДП в ИК и видимом диапазонах. Во-вторых, существует нестационарный режим слабого возбуждения, когда почти неограниченная двухфотонная ионизация постепенно увеличивает ρ_{eh} в течение возбуждающего импульса. В результате, наблюдаемый показатель степени $B \approx 0.77 > 2/3$ может отражать динамическую последовательность в течение УКИ накачки режима чистого двухфотонного поглощения ($\rho_{\text{eh}} \propto F^2$) на переднем фронте УКИ накачки при $\rho_{\text{eh}} < 10^{21}$ см $^{-3}$ и квази-стационарного режима двухфотонной ионизации, ограниченной оже-рекомбинацией при достижении $\rho_{\text{eh}} > 10^{21}$ см $^{-3}$ в пике интенсивности УКИ накачки и далее ($\rho_{\text{eh}} \propto F^{2/3}$). Ранее эффект Оже-рекомбинации наблюдался только в пикосекундной динамике ЭДП.

В области сильной перенормировки на Рис. 3г ($F < 0.5-0.6$ Дж/см 2) сигнал электронной эмиссии изменяется слабо – $U_e(F) \propto F^{1.16 \pm 0.04}$ (Рис. 4, справа), а в области насыщенной перенормировки ($F > 0.5$ Дж/см 2 , плато отражения) показывает нелинейный рост $U_e(F) \propto F^{4.1 \pm 0.4}$. В области насыщения плазменной перенормировки зонной щели плотность ЭДП меняется слабо в силу баланса двухфотонной ионизации и оже-рекомбинации, но скорость Оже-рекомбинации быстро растет одновременно с нелинейным ростом выхода горячих электронов – согласно оценке интеграла скорости оже-рекомбинации в виде $R(\rho_{\text{eh}}) \sim \gamma_a(\rho_{\text{eh}})\rho_{\text{eh}}^3\tau_{\text{las}}$. В результате, с ростом F оцениваемый выход горячих носителей $R(\rho_{\text{eh}}) \propto F^1$ нелинейно ускоряется – вплоть до $R(\rho_{\text{eh}}) \propto F^4$ при $F \leq 4$ Дж/см 2 , что количественно согласуется с зависимостями $U_e(F)$ на Рис. 4. Фактически, как и в случае металлов, при насыщении перенормировки зонной щели начинается быстрый нагрев ЭДП через механизм оже-рекомбинации, а горячие электроны далее участвуют в эмиссии. Наблюдаемая выраженная корреляция динамики (в частности – насыщения) коэффициента само-отражения УКИ накачки и отражения пробных УКИ с выходом эмиссии плазмы подтверждает сверхбыстрый характер процесса эмиссии зарядов.

В пятой главе «Электрон-фононная релаксация фотовозбужденных материалов с сильным межзонным поглощением» рассматриваются два взаимосвя-

занных диссипативных процесса в электронной подсистеме – электрон-фононной релаксации и транспорта (преимущественно, путем электронной и/или решеточной теплопроводности) поглощенной энергии УКИ накачки, предшествующих плавлению и абляции материалов. В рамках двухтемпературной модели [23], электрон-фононная релаксация приводит к снижению электронной температуры и ее пространственных градиентов (для больших, мультимикронных фокальных пятен – преимущественно в глубину мишени), и, напротив, к увеличению решеточной (ионной) температуры до единых квазиравновесных значений (электрон-фононная термализация, ЭФТ). Времена ЭФТ определяют ключевые характеристики абляционного лазерного воздействия – момент начала абляции, благодаря теплопроводности – размеры области теплового воздействия и пространственное разрешение абляции (в том числе – латеральное и в глубину), а также количество удаленного за импульс вещества. Согласно расчетам, параметры ЭФТ для некоторых материалов существенно – в несколько раз – изменяются в зависимости от T_{el} , причем в разную сторону – в зависимости от структуры зонного спектра и соответствующей плотности электронных состояний. Коэффициенты теплопроводности изменяются в зависимости от величины T_{el} более однозначно, но тоже весьма существенно. До сих пор в литературе присутствуют преимущественно расчетные зависимости величины параметров ЭФТ и теплопроводности в зависимости от T_{el} , и поэтому экспериментальные исследования, верифицирующие имеющиеся теоретические зависимости, имеют большое фундаментальное и практическое значение.

В настоящей работе предложена принцип, позволяющий измерить ЭФТ-времена по положению минимума пороговой плотности энергии для одноимпульсной абляции материалов в зависимости от длительности УКИ накачки в фемто-пикосекундном диапазоне при значении τ_{ep} . В отсутствие артефактов, промежуточный минимум порога абляции имеет место, поскольку величина τ_{ep} разделяет стадии электронной и решеточной динамики, где в стадии электронной динамики для более высоких электронных температур (и их градиентов) имеют место более значительные транспортные и эмиссионные (излучение, заряженные частицы) потери, а также могут существенно отличаться оптические постоянные промежуточного состояния вещества, как показано путем время-разрешенного зондирования в предыдущих и последующих главах. Кроме того, предложены дополнительные измерительные процедуры, уточняющие интерпретацию зависимостей порогов абляции от длительности УКИ: 1) измерение зависимости коэффициента отражения материала в диапазоне изменения поро-

говых значений плотности энергии, позволяющее учесть влияние на пороги абляции динамики оптических постоянных материала в течение УКИ в электронной и решеточной фазах релаксации, 2) измерение и анализ характерных латеральных $1/e$ -радиусов области абляции w_{abl} , которые для каждого материала в рамках одного механизма фотовозбуждения зависят уже только от процесса теплопроводности, а также указывают наличие процессов N -фотонного фотовозбуждения материалов, которые проявляющегося не только в порогах абляции, но и в размерах характерной области вложения энергии за счет обострения размеров фокусировки гауссовского пучка в $\sqrt{N}$ раз.

Методика оценки характерных времен ЭФТ разрабатывалась в разделе 5.1 на примере железа (с измерением зависимости порогов абляции F_{th} и коэффициента отражения вблизи F_{th} от τ_{las} , Рис.5, слева), далее развивалась на примере перспективных для плазмоники «хороших» металлов с теоретически предсказанными большими временами ЭФТ – алюминия, серебра и меди. При этом, для ряда материалов с сильным межзонным поглощением – кремния, меди – при многофотонной накачке УКИ ИК-диапазона зависимости порогов от τ_{las} демонстрируют монотонный квадратно-коренной рост (Рис. 5, справа), отражающий,

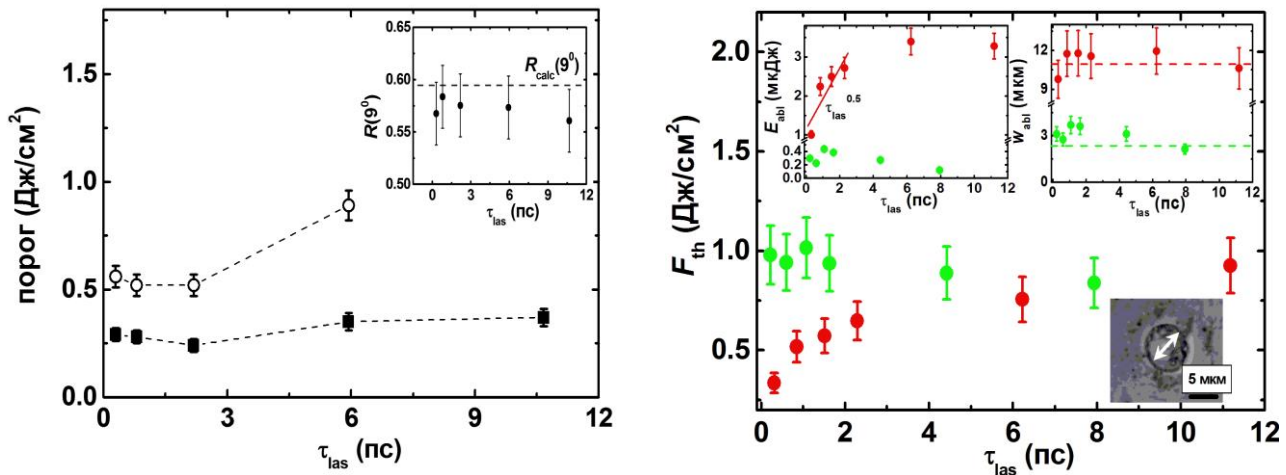


Рис. 5. (слева) Зависимости порогов откольной (F_{spal} , темные квадраты) и фрагментационной (F_{frag} , светлые кружки) абляции железа от τ_{las} . На вставке: зависимость отражения УКИ накачки $R(9^\circ)$ при $F_0 \approx 0.5$ Дж/см² от τ_{las} с приведенным расчетным значением отражения $R_{calc}(9^\circ)$ для невозбужденного железа. (справа) Зависимости порога откольной абляции F_{th} кремния от τ_{las} для видимого (515 нм, зеленые кружки) и ИК (1030 нм, красные кружки) излучения. Вставки: сверху – зависимости от τ_{las} для пороговой энергии E_{abl} и $1/e$ -радиуса абляции w_{abl} с радиусами фокусировки $R_{1/e}$ (горизонтальные пунктирные линии), внизу – оптический микроснимок кратера и его диаметр, показанный белой стрелкой.

тем не менее, не потери из-за теплопроводности, а нелинейный характер фотовозбуждения. В частности, при фиксированной величине F интенсивность УКИ падает с ростом τ_{las} и для поддержания энерговклада ε_{abl} путем многофотонной накачки требуется увеличение пороговой плотности энергии с ростом τ_{las}

$$\varepsilon \propto \left(\frac{F}{\tau_{las}} \right)^n \tau_{las}, \quad F_{th} \propto \sqrt[n]{\varepsilon_{abl} \tau_{las}}, \quad (5)$$

что позволяет выразить F_{th} как функцию τ_{las} в общем случае n -фотонного поглощения в виде $F_{th} \propto \tau_{las}^{(n-1)/n}$. В режиме линейного фотовозбуждения таких полупроводников и переходных металлов – кремния, алюминия, серебра, меди – данные артефакты исчезали (Рис. 5, справа), сохраняя типичный немонотонный вид зависимости с промежуточным минимумом или выглаживанием кривой; для сравнения анализировалось также поведение характерных $1/e$ -радиусов абляции w_{abl} , показывающих уменьшение с ростом τ_{las} ввиду уменьшения T_{el} .

Дополнительный анализ характерных $1/e$ -радиусов абляции для пленок аморфного кремния с линейным фотопоглощением в видимом диапазоне позволил в разделе 5.2 с помощью данной методики впервые за последние почти сорок лет установить величину коэффициента амбиполярной диффузии ЭДП D в абляционном режиме воздействия УКИ для $\tau_{las} \sim 0.1$ -10 пс. Предыдущее значение $D \sim 10$ см²/с было измерено еще в 1982 году для умеренных плотностей ЭДП $\sim 10^{20}$ - 10^{21} см⁻³ [24], тогда как в настоящей работе более высокая величина $D \sim (1-2) \times 10^3$ см²/с установлена для ЭДП с плотностью $\sim 10^{22}$ см⁻³, определяющая несравнимо более быстрый пикосекундный перенос вложенной энергии ЭДП по сравнению с решеточной теплопроводностью в кристаллическом материале ~ 0.7 см²/с. Установленная величина коэффициента амбиполярной диффузии является важным транспортным параметром для корректного описания временного оптического отклика фотовозбужденных полупроводниковых наноструктур в сверхбыстрых переключателях, преобразователях поляризации и метаповерхностях, а также электронной динамики в сильноточковых режимах функционирования силовой полупроводниковой электроники или в условиях воздействия мощного ионизирующего излучения в космосе.

В шестой главе «Динамика плавления материалов под действием УКИ» на примерах кремния, арсенида галлия и графита описана разработанная автором акусто-модуляционная рефлектометрическая методика с временным разрешением для идентификации плавления поверхностного слоя материалов и динамического измерения глубины плавления с учетом эффекта абляции. По аналогии с

предшествующими широкополосными ультразвуковыми исследованиями автором лазерно-индуцированных фазовых и ударно-волновых явлений в конденсированной фазе, данная методика основана на измерении периода динамических осцилляций отражения пробных УФ (400 нм, характерная глубина зондирования ≈ 10 нм) УКИ от поверхности материалов, возбужденной ИК (800 нм) УКИ, где осцилляции отражения связаны с реверберациями (эхо) акустической волны сжатия/разгрузки различной природы (фазовое превращение, нагревание) в приповерхностном слое расплава с достаточным акустическим контрастом – соотношением акустических импедансов твердого материала (s) и его расплава (m). По данным литературы, акустические импедансы составляют: для кремния – $\rho_s C_{l,s}(100) \approx 2.0 \times 10^7$ кг/м²с для плотности $\rho_s = 2.33 \times 10^3$ кг/м³ и продольной скорости звука в направлении [100] $C_{l,s}(100) = 8.4$ км/с, $\rho_m C_{l,m} \approx 1.0 \times 10^7$ кг/м²с для плотности $\rho_m = 2.55 \times 10^3$ кг/м³ и зависящей от температуры продольной скорости звука $C_{l,m} \leq 3.9$ км/с, для GaAs – $\rho_s C_s \approx 5.3 \times 10^3$ кг/м³ $\times 4 \times 10^3$ м/с = 2.1×10^7 кг/м²с и $\rho_m C_m \approx 5.7 \times 10^3$ кг/м³ $\times 2.26$ км/с $\approx 1.3 \times 10^7$ кг/м²с.

В случае кремния, увеличивающиеся во времени периоды ревербераций $T_{1,rev}$ (Рис. 6), наблюдаемые, начиная с порога сверхбыстрого плавления $F_{melt} \approx 0.23$ Дж/см², отражают толщину пленки расплава Y_1 , постепенно увеличивающуюся с течением времени Δt , начиная от поверхности, и затем насыщающуюся на уровне $Y_{1,max}$. В частности, для жесткой границы твердое тело/расплавы кремния с $\rho_m C_{l,m} < \rho_s C_{l,s}(100)$, осцилляции отражения должны проявляться на кривых $R_{2\omega}(\Delta t)$ в той же фазе после двух круговых обходов пленки расплава, встречая на пути два раза свободную границу расплава/воздух, где каждый раз происходит изменение фазы на π . Соответственно, можно выразить $Y_1(\Delta t) = \frac{1}{4} C_{l,m} T_{1,rev}(\Delta t)$ и получить абсолютную калибровку мгновенной толщины расплава. Кривые $Y_1(\Delta t)$ для различных значений $F > F_{melt}$ демонстрируют на Рис. 6 почти постоянные угловые наклоны для $Y_1(\Delta t) \propto \Delta t$, указывая, по-видимому, на плавление материала в результате баллистического пробега фронта плавления от поверхности в нагретом твердом слое. Согласно данным Рис. 6, характерные скорости плавления $V_{melt} \approx 0.4$ км/с находятся в полу-количественном согласии с известными из литературы единичными значениями максимальной скорости фронта гетерогенного плавления для других полупроводников в интервале 0.35-0.85 км/с. При этом с помощью методики измерения термоупругой модуляции отражения поверхности кремния впервые установлены зависимость ее пиковой тем-

пературы от F вблизи порога плавления и ее существенный перегрев (до 20%) для квазиравновесного термического плавления кремния под действием УКИ.

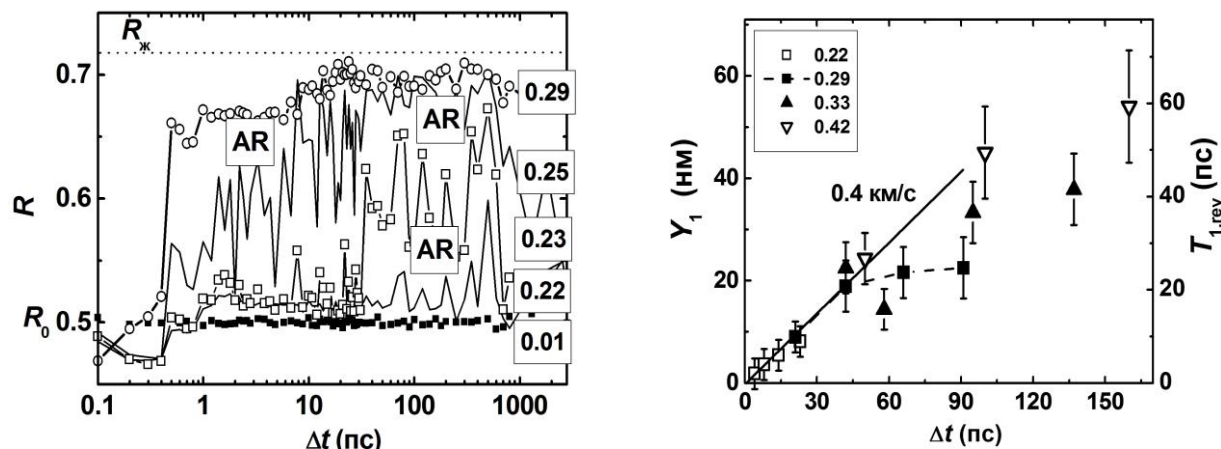


Рис. 6. (слева) Акустические реверберации (AR) на кривых $R_{20}(\Delta t)$ в случае кремния для значений $F_{\text{melt}} < F < F_{\text{spall}} \approx 0.5 \text{ Дж/см}^2$, приведенных в рамке. (справа) Временная динамика периода ревербераций $T_{1,\text{rev}}$ (правая ось) и соответствующая толщина расплава Y_1 (левая ось) для различных значений $F < F_{\text{spall}} \approx 0.50 \text{ Дж/см}^2$ (даны в рамке). Прямая линия представляет начальный этап движения фронта плавления со скоростью $\approx 0.4 \text{ км/с}$.

С использованием разработанной методики проведены измерения для кремния, арсенида галлия и графита, в результате которых впервые экспериментально установлен факт движения фронта плавления с поверхности, измерены максимальные скорости его движения и глубины проплавления (в зависимости от F), для графита установлена ранее неизвестная величина продольной скорости звука в расплаве – 1.6 км/с (исходя из возможных соотношений акустических импедансов графита и его расплава). В настоящий момент в мире известна только одна другая экспериментальная методика – с использованием пробных УКИ рентгеновского излучения (малоугловое рентгеновское рассеяние), позволяющая проследить *наносекундную* динамику проплавления поверхностного слоя материалов, однако, она отличается высокой сложностью аппаратуры и техники измерений, а также многократно меньшим объемом данных (одна серия измерений – только для одного значения F).

В седьмой главе «Механизмы абляции материалов под действием УКИ» рассматриваются заключительные стадии ФЛА, связанные непосредственно с абляционным удалением материалов. В частности, исследуются суб-критическая откольная абляция, а также около- и фрагментационная абляция («фазовый взрыв») поверхности материалов под действием УКИ в виде взрывного гидро-

динамического разлета закритического флюида – их ключевые механизмы и базовые параметры – характерные глубины кратеров, температуры, давления и скорости разлета вещества. Традиционно откольной абляцией называют вынос дисков холодного материала с тыльной поверхности мишеней, подвергаемых воздействию мощных лазерных пучков или снарядов (ударников), в результате разрыва материала при сложении прямой волны разгрузки и предшествующей волны сжатия, отраженной от тыльной поверхности. Тем не менее, в последние десятилетия так (spallation) называют также и отрыв пленки холодного вещества или расплава с облучаемой фронтальной поверхности. Для холодного вещества отрыв пленки обычно связан с термомеханическими напряжениями, тогда как для расплава предсказаны разные механизмы: 1) механический разрыв при сложении двух – прямой и отраженной – волн разгрузки [25] и 2) «чистый» термомеханический отрыв в прямой волне разрежения [26] (оба – на временах акустической разгрузки расплава), 3) отрыв при задержанном вскипании акустически-релаксированного (термо-расширенного) расплава [27]. Вместе с тем, до сих пор надежных экспериментальных доказательств в пользу какого-либо из данных механизмов – например, временных масштабов их реализации – не существует.

В разделе 7.1 методом сканирующей электронной микроскопии была впервые детально и с высоким увеличением (до 200 000×) исследована топография поверхности откольных абляционных кратеров различных материалов (алюминий, кремний, золото) при однократном воздействии УКИ. Обнаружено формирование в результате *спонтанного* подповерхностного вскипания термически-растянутого квазиравновесного расплава подпороговых кавитационных нано- и микрокаверн – как вскрытых, так и замороженных под поверхностью, поверхностная плотность и размер которых быстро возрастают при приближении к порогу откольной абляции (краю кратера, Рис. 7). Это наблюдение хорошо согласуется с результатами термомодуляционных рефлектметрических измерений температуры расплава алюминия данной работы, показывающими, что порог откольной абляции для алюминия соответствует температуре кипения материала при атмосферном давлении. Структура края откольного кратера имеет отрывной характер с зазубринами вдоль бортика, который сам частично отслаивается уже при подпороговых значениях F , а структура дна вблизи внутреннего края кратера имеет ламелеобразный характер. В совокупности, это указывает на синхронный отрыв пленки расплава в результате формирования подповерхностной паровой или пенной полости в результате слияния множественных нанопузырей с выделением высокого парового давления, стабилизировавшего эти нанопузыри

против сил поверхностного натяжения, что ранее наблюдалось автором в тонком слое легкокипящих жидкостях (вода, изопропиловый спирт) на поверхностях кремния, нагреваемых наносекундными лазерными импульсами. Наблюдение пенообразной структуры дна откольного кратера в виде нерегулярных или квазирегулярных поверхностных наноструктур подтверждает такой механизм.

Исследования динамики и базовых параметров абляции в зависимости от поглощенной (с учетом само-отражения) плотности энергии УКИ накачки про-

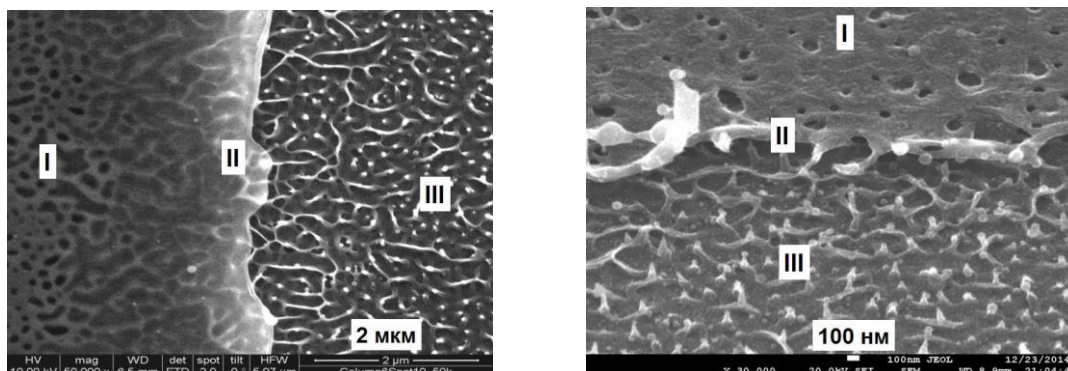


Рис. 7. Снимок СЭМ одноимпульсных кратеров на поверхности алюминия при пиковой величине $F \approx 0.95$ Дж/см² (слева, вид сверху) и 1.9 Дж/см² (справа, вид сбоку из центра кратера под углом 40°). Римскими цифрами обозначены области поверхностной кавитации (I), край кратера (II) и дно кратера (III).

водились с использованием микроскопической рефлектометрической методики с временным разрешением. Измерялись характерные времена удаления вещества, определяющие пространственно-временные масштабы транспорта энергии в мишени и соответствующее пространственное разрешение ФЛА, а также гидродинамические параметры ударных волн сжатия. В частности, в случае откольной абляции на поверхности кремния, арсенида галлия, графита, алюминия начало абляции T_{rup} вблизи порога происходило в субнаносекундном диапазоне (в диапазоне 0.1-0.5 нс) (Рис. 8,9), быстро уменьшаясь с ростом F , а в случае фрагментационной абляции – на временах акустической разгрузки τ_{dec} с нисходящей зависимостью от F (Рис. 9). Скорости отлета оторванного слоя расплава, оцениваемые по динамическим интерференционным особенностям отражения (интерференция реплик пробного УКИ, отраженных от двигающейся пленки высокоотражающего расплава и его короткоживущего остатка на поверхности – Рис. 8), составляли ~ 1 км/с (Рис. 9), возрастая при увеличении F . Начало откольной абляции и ее переход к фрагментационной идентифицировались по изменению интерференционного контраста. Эти результаты количественно подтверждаются

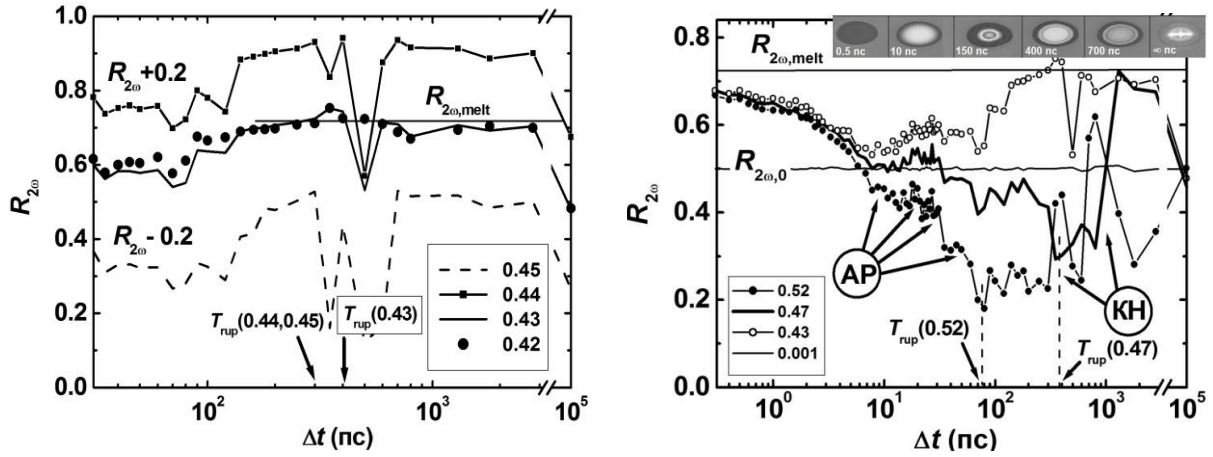


Рис. 8. (слева) Кривые $R_{2\omega}(\Delta t)$ (сдвинуты для удобства представления) для значений $F = 0.42-0.45 \text{ Дж/см}^2 < F_{\text{spall}}$, приведенных в рамке. Стрелки показывают соответствующие моменты разрыва пленки расплава $T_{\text{rup}}(F)$. (справа) Кривые $R_{2\omega}(\Delta t)$ для различных значений $F < F_{\text{spall}}$ и $F \geq F_{\text{spall}}$ ($F_{\text{spall}} \approx 0.5 \text{ Дж/см}^2$), приведенных в рамке. Метки AP, КН и T_{rup} отмечают, соответственно, его модуляцию вследствие акустических ревербераций в расплаве и оптической интерференции (кольца Ньютона), а также задержки кавитационного разрыва расплава для различных значений F .

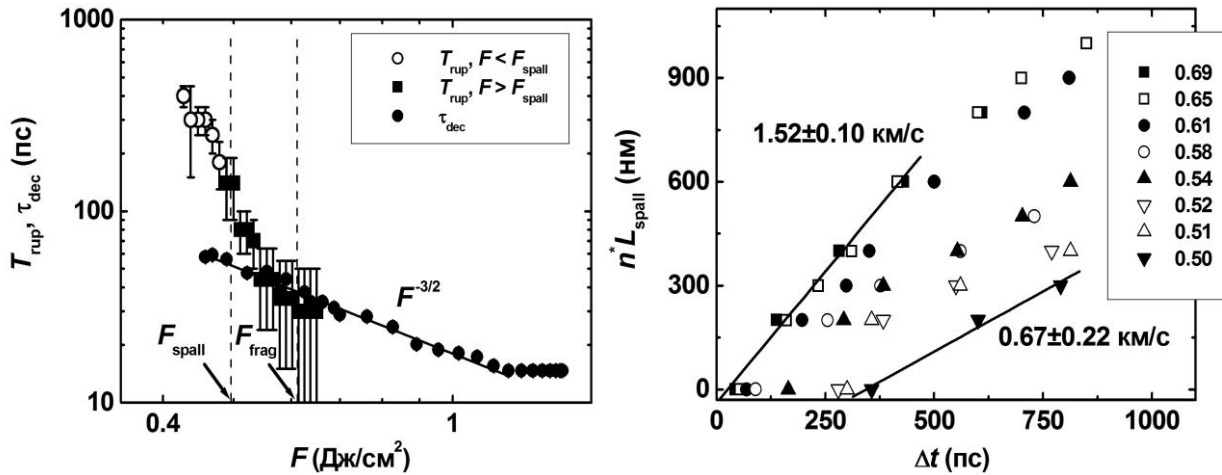


Рис. 9. (слева) Зависимости задержки разрыва пленки расплава T_{rup} (ниже и выше порога F_{spall}) и характерного времени разгрузки закритического флюида τ_{dec} от F . Наклонная прямая представляет аппроксимацию последней зависимости в координатах $\log \tau_{\text{dec}} - \log F$ с угловым наклоном $3/2$. Вертикальные штриховые линии показывают положение порогов откольной (F_{spall}) и фрагментационной (F_{frag}) абляции. (справа) Истории отлета $n^*L_{\text{spall}}(\Delta t)$ откольного слоя для разных значений $F \geq F_{\text{spall}}$, приведенных в рамке. Аппроксимационные прямые и угловые наклоны приведены для крайних значений $F \approx 0.50$ и 0.69 Дж/см^2 .

данными пространственно- и время-разрешенной оптико-эмиссионной спектроскопии абляционных факелов, позволяющих измерить их скорости и характерные времена разлета в зависимости от F . Глубины откольной абляции соответствовали мгновенному изменению толщины расплава (периода акустических ревербераций) с началом отрыва пленки и были фиксированы, тогда как глубины фрагментационной абляции монотонно возрастали с ростом F .

Для исследования гидродинамического разлета непрозрачного и сильно рассеивающего за критического флюида при фрагментационной абляции была разработана методика бесконтактной широкополосной ультразвуковой диагностики (Рис. 10). В этом режиме ФЛА информативные фронтальные интерферометрические или рефлектометрические измерения невозможны, а более информативными оказываются методы динамической оптической диагностики с боковой

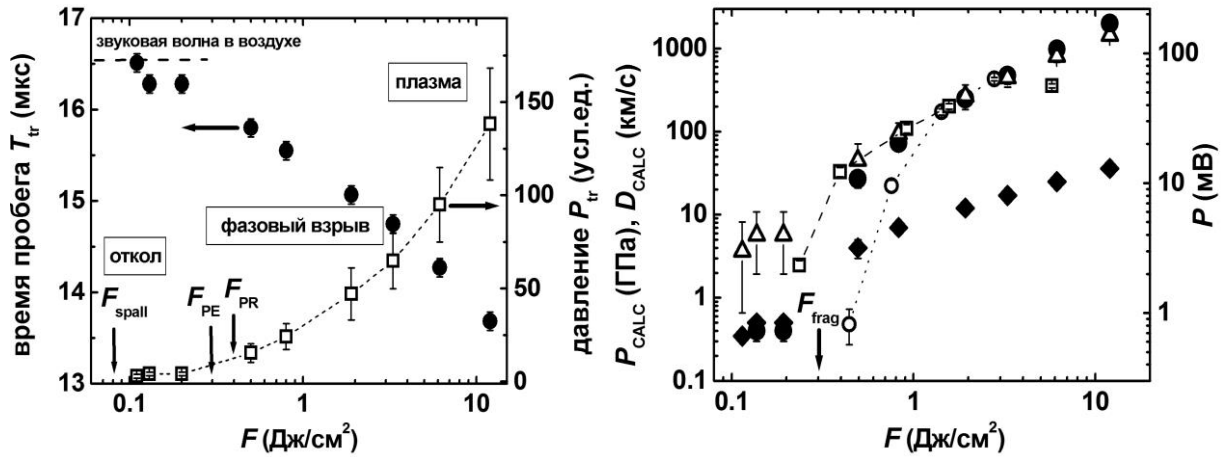


Рис. 10. (слева) Зависимости от F для времени пробега волны давления T_{tr} (левая ось, темные кружки) и ее амплитуды P_{tr} (правая ось, светлые квадраты) при абляции титана. Метки F_{spall} , F_{PE} , F_{PR} показывают пороги откола, фазового взрыва и генерации УВ. (справа) Зависимости расчетного начального давления абляционного факела P_{calc} (темные круги) и его скорости расширения D_{calc} (темные ромбы) (левая/нижняя оси, размер погрешности – менее размера символов), а также зависимости амплитуды измеренных акустических давлений P_{S-NC} в бесконтактной моде для титановой пластины (светлые треугольники), P_{S-C} и P_{F-C} в контактной моде для пластины (светлые круги) и фольги (светлые квадраты), соответственно, от F . Стрелкой показан порог F_{frag} для абляции титана УКИ через взрывное гидродинамическое расширение сверхкритического флюида.

подсветкой – теневая и оптико-эмиссионная фотография, оптико-эмиссионная спектроскопия (последняя использовалась в работе для верификации данных ультразвуковых измерений). В ультразвуковых исследованиях измерялись время пробега, полуширина и амплитуда импульса волны давления в зависимости от

плотности энергии и радиуса фокального пятна УКИ, расстояния пробега от зоны абляции до ультразвукового датчика. Выше порога взрывной абляции отмечались монотонное уменьшение времени пробега (Рис.10), а также рост полуширины и амплитуды сигнала с ростом F .

Данная методика позволяет установить для различных материалов в рамках модели точечного взрыва [28] начальные давления и скорости расширения абляционного факела в воздухе в зависимости от параметров лазерного воздействия и связать их с параметрами выходных волн давления на тыльной стороне мишени. Зависимость абляционного давления растет суперлинейно с ростом плотности энергии УКИ, примерно отражая линейный рост энерговклада в мишень. Впервые экспериментально продемонстрированы уникальные сверхэластический режим распространения ударной волны (УВ) в мишени титана при давлениях выше 10 ГПа и высокодиссипативный режим ее распространения при меньших давлениях (Рис. 10, справа), улучшенные прочностные характеристики УВ-упрочненного поверхностного слоя алюминиевого сплава при наносекундных временных масштабах нагружения поверхности после воздействия УКИ, остаточные упрочняющие сжимающие напряжения ГПа-уровня в поверхностном слое конструкционного титанового сплава, предложено использовать эту методику для бесконтактной количественной диагностики таких явлений в конденсированной фазе или контроля режимов ее обработки УКИ.

В **Заключении** обобщаются основные результаты экспериментальных исследований проделанной диссертационной работы, направленных на изучение основных закономерностей ключевых стадий ФЛА под действием УКИ видимого/ближнего ИК-диапазона для металлов и полупроводников с сильным межзонным поглощением – нелинейного вложения энергии, неравновесного нагревания и плавления, а также самого абляционного удаления вещества, в совокупности *формирующих целостную феноменологическую картину данного явления* для материалов этих типов. Отмечается, что данная картина ФЛА сложилась из следующих впервые полученных **основных результатов** исследований:

1. Интенсивное фотовозбуждение простого (алюминий) и переходного (титан) металлов в абляционном режиме (плотности энергии 0.1-1 Дж/см²), согласно их оптическому отклику в отражении УКИ накачки ближнего ИК-диапазона (для алюминия – на длине волны ≈ 800 нм) и/или пробных УКИ, вызывает насыщение сильных межзонных переходов в течение возбуждающих УКИ (≈ 100 фс) с одновременным нарастанием роли внутризонных электронных переходов, что сопровождается нагреванием электронной подсистемы до температур ~ 1 эВ и

нелинейной по плотности энергии излучения эмиссией электронов и ионов, наблюдаемых, соответственно, в зависимостях коэффициента оптического отражения и электрических коллекторных сигналов от плотности энергии УКИ.

2. Для теллура при возбуждении ЭДП с плотностью $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ наблюдается в спектрах отражения безынерционный «красный» сдвиг, соответствующий мгновенной, изотропной и линейной по плотности ЭДП электронной перенормировке ширины запрещенной зоны с угловым наклоном, указывающим – в соответствии с предсказаниями теории – на возможность сильной (до 50%) перенормировке при возбуждении $\approx 5\%$ плотности валентных электронов. В согласии с предсказаниями теории аналогичный по величине вклад осуществляется субпикосекундной решеточной перенормировкой.

3. Учет установленных особенностей перенормировки ширины запрещенной зоны в полупроводниках позволил описать изменения коэффициента отражения арсенида галлия и кремний при возбуждении ЭДП с плотностью до 10^{22} см^{-3} под действием УКИ накачки длительностью ≈ 100 фс. В случае кремния и арсенида галлия рост электронной перенормировки зонной щели до максимальной (50%) величины сопровождается соответствующим нелинейным увеличением коэффициента и скорости трехчастичной оже-рекомбинации с резким замедлением роста плотности ЭДП в пользу ее нагревания и эмиссии электрон-ионной плазмы, нелинейной по плотности энергии излучения.

4. В отсутствие маскирующего эффекта многофотонного поглощения пороговые плотности энергии одноимпульсной абляции металлов (железо, алюминий, медь, серебро) при воздействии УКИ накачки варьируемой длительности (здесь и ниже – видимого-ближнего ИК-диапазона) имеют не восходящий, а немонотонный характер с минимумом зависимости при различных длительностях импульса в диапазоне 1-3 пс, соответствующих для этих материалов характерному времени переноса энергии из электронной в ионную подсистему. В результате, для металлов электрон-фононная релаксация происходит в несколько раз быстрее, чем предсказывается существующими моделями.

5. Для кристаллического кремния перенос энергии из электронной в ионную подсистему неравновесными носителями, генерируемыми в результате оже-рекомбинации, нелинейной по плотности ЭДП, завершается на пикосекундных масштабах из-за рекомбинационного падения плотности плазмы и ее быстрой амбиполярной диффузии, для аморфного кремния – примерно за 0.6 пс. Величина коэффициента амбиполярной диффузии плотной ЭДП (10^{22} см^{-3}) для аморфного кремния находится на уровне $10^3 \text{ см}^2/\text{с}$.

6. Благодаря почти двукратно меньшему акустическому импедансу расплавов кремния и арсенида галлия чуть выше пороговой плотности энергии УКИ для плавления этих материалов в пикосекундном масштабе времени возникает сильная квазипериодическая модуляция коэффициента отражения пробного УКИ из-за ревербераций акустической волны в слое расплава, растущем со скоростями в диапазоне 400-600 м/с. В до-абляционном режиме толщина слоя расплава ограничивается положением определенной изотермы плавления материала (для кремния – на 20% выше равновесной температуры плавления), в абляционном режиме – уменьшается из-за отрыва части слоя расплава выше порога откольной абляции. Измерены максимальные глубины проплавления в зависимости от величины поверхностной плотности энергии УКИ. Для графита оценена продольная скорость звука в его расплаве (1.6 км/с) в условиях завершённой акустической разгрузки.

7. Откольная абляция поверхностного слоя расплава для алюминия, кремния, арсенида галлия и графита под действием УКИ с умеренной (<1 Дж/см²) плотностью энергии и длительностью ≈ 100 фс происходит после его акустической разгрузки в результате подповерхностного гомогенного вскипания в термически-расширенном расплаве с характерными субнаносекундными задержками, определяющимися величиной плотности энергии. На дне откольных кратеров обнаружены следы нанопены, вне кратеров – кавитационные структуры. Отлет слоя расплава на микрометровых расстояниях от поверхности со скоростями ~ 0.1 -1 км/с, определяющимися величиной плотности энергии УКИ накачки, управляется субкритическим давлением в подповерхностной паровой полости.

8. Методом широкополосной ультразвуковой диагностики волн давления, распространяющихся в воздухе в результате фрагментационной ФЛА непосредственно от аблируемой поверхности, определены начальные давления мегабарного уровня (~ 10 - 10^3 ГПа) и начальные скорости сверхзвукового расширения закритического флюида в виде абляционного факела (до 30 км/с) в зависимости от плотности энергии УКИ (>1 Дж/см²) длительностью ≈ 100 фс, подтверждаемые оптико-эмиссионными измерениями скорости движения видимого фронта абляционного факела с наносекундным временным разрешением. Зависимость абляционного давления растёт сверхлинейно с ростом плотности энергии УКИ, отражая рост энерговклада в мишень.

9. С помощью бесконтактной фронтальной и контактной тыльной регистрации волн давления в тонких и толстых образцах титана в данном режиме ФЛА обнаружен сверхупругий режим распространения ударной волны в мишенях при

давлениях выше 10 ГПа и диссипативный режим ее распространения при меньших давлениях. Генерируемые высокие (суб-ТПа) давления вызывают упрочнение поверхностного слоя алюминиевого сплава и возникновение остаточных упрочняющих сжимающих напряжений ГПа-уровня в субмикронном поверхностном слое конструкционного титанового сплава.

Список публикаций по теме диссертационной работы

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Кудряшов С. И., Емельянов В. И. Коллапс запрещенной зоны и сверхбыстрое «холодное» плавление кремния в течение фемтосекундного лазерного импульса // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2001. – Т. 73. – №. 5. – С. 263-267.
2. Кудряшов С. И., Емельянов В. И. Уплотнение электронного газа и кулоновский взрыв в поверхностном слое проводника, нагреваемого фемтосекундным лазерным импульсом // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2001. – Т. 73. – №. 12. – С. 751-755.
3. Кудряшов С. И., Емельянов В. И. Структурные переходы в GaAs в течение лазерного импульса длительностью 100 фс // Quantum Electronics. – 2001. – Т. 31. – №. 7. – С. 565-566.
4. Кудряшов С. И., Емельянов В. И. Структурные переходы в кремнии под действием фемтосекундного лазерного импульса: роль электронно-дырочной плазмы и фонон-фононного ангармонизма // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2002. – Т. 121. – №. 1-3. – С. 113.
5. Kudryashov S. I., Allen S. D. Photoacoustic study of KrF laser heating of Si: Implications for laser particle removal // Journal of Applied Physics. – 2002. – V. 92. – №. 10. – P. 5627-5631.
6. Kudryashov S. I., Allen S. D. Photoacoustic study of explosive boiling of a 2-propanol layer of variable thickness on a KrF excimer laser-heated Si substrate // Journal of Applied Physics. – 2004. – V. 95. – №. 10. – P. 5820-5827.
7. Kudryashov S. I., Allen S. D. Plume optical transmission studies of a thin 2-propanol layer lifting off from a laser-heated Si substrate // Applied Physics A. – 2004. – V. 79. – №. 7. – P. 1737-1739.
8. Kudryashov S. I., Allen S. D., Papernov S., Schmid A. W. Nanoscale laser-induced spallation in SiO₂ films containing gold nanoparticles // Applied Physics B. – 2006. – V. 82. – №. 4. – P. 523-527.

9. Kudryashov S. I., Lyon K., Allen S. D. Photoacoustic study of relaxation dynamics in multibubble systems in laser-superheated water //Physical Review E. – 2006. – V. 73. – №. 5. – P. 055301.
10. Kudryashov S. I., Allen S. D. Submicrosecond dynamics of water explosive boiling and lift-off from laser-heated silicon surfaces //Journal of Applied Physics. – 2006. – V. 100. – №. 10. – P. 104908.
11. Kudryashov S. I., Kandyla M., Roeser C., Mazur E. Intraband and interband optical deformation potentials in femtosecond-laser-excited α -Te //Physical Review B. – 2007. – V. 75. – №. 8. – P. 085207.
12. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Seleznev L. V. Near-critical phase explosion promoting breakdown plasma ignition during laser ablation of graphite //Physical Review E. – 2010. – V. 82. – №. 1. – P. 016404.
13. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В. Ультразвуковая диагностика оптического пробоя и субкритической микроплазмы в лазерном факеле //Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук. – 2011. – №. 6.
14. Голосов Е. В., Ионин А. А., Колобов Ю. Р., Кудряшов С. И., Лигачев А. Е., Новоселов Ю. Н., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Сверхбыстрые изменения оптических свойств поверхности титана и фемтосекундная лазерная запись одномерных квазипериодических нанорешеток ее рельефа //Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т. 140. – №. 1. – С. 21-35.
15. Golosov E. V., Ionin A. A., Kolobov Yu. R., Kudryashov S. I., Ligachev A. E., Makarov S. V., Novoselov Yu. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Sharipov A. R. Near-threshold femtosecond laser fabrication of one-dimensional subwavelength nanogratings on a graphite surface //Physical Review B. – 2011. – V. 83. – №. 11. – P. 115426.
16. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Генерация и регистрация сверхмощных ударных волн при абляции поверхности алюминия под действием высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т. 94. – №. 1. – С. 35-39.
17. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Лигачев А. Е., Макаров С. В., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Наномасштабная кавитационная неустойчивость поверхности расплава вдоль штрихов одномерных решеток нанорельефа на поверхности алюминия // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т. 94. – №. 4. – С. 289-292.

18. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Динамика откольной абляции поверхности GaAs под действием фемтосекундных лазерных импульсов // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2011. – Т. 94. – №. 10. – С. 816-822.
19. Apostolova T. T., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Self-limited ionization in bandgap renormalized GaAs at high femtosecond laser intensities //Optical Engineering. – 2012. – V. 51. – №. 12. – P. 121808.
20. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Салтуганов П. Н., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В., Шарипов А. Р. Сверхбыстрая электронная динамика поверхности кремния, возбужденной интенсивным фемтосекундным лазерным импульсом // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2012. – Т. 96. – №. 6. – С. 413-418.
21. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В., Бункин А. Ф., Леднев В. Н., Першин С.М. Термическое плавление и абляция поверхности кремния фемтосекундным лазерным излучением //Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2013. – Т. 143. – №. 3. – С. 403.
22. Ионин А. А., Емельянов В. И., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Нелинейный режим возбуждения поверхностной электромагнитной волны на поверхности кремния интенсивным фемтосекундным лазерным импульсом //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2013. – Т. 97. – №. 3. – С. 139-144.
23. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Ligachev A. E., Golosov E. V., Kolobov Yu. R. Sub-100 nanometer transverse gratings written by femtosecond laser pulses on a titanium surface //Laser Physics Letters. – 2013. – V. 10. – №. 5. – P. 056004.
24. Губко М. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Руденко А. А., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Фокусировка интенсивных поверхностных электромагнитных волн фемтосекундной длительности //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2013. – Т. 97. – №. 10. – С. 687-692.
25. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Rudenko A. A., Saltuganov P. N., Seleznev L. V., Sunchugasheva E. S. Femtosecond laser fabrication of sub-diffraction nanoripples on wet Al surface in multi-filamentation regime: High optical harmonics effects? //Applied Surface Science. – 2014. – V. 292. – P. 678-681.
26. Артюков И. А., Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Салтуганов П. Н. Релаксационные процессы электронной и решеточной подсистем при абляции поверхности железа ультракороткими лазерными импульсами

//Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2014. – Т. 99. – №. 1. – С. 54-58.

27. Gubko M. A., Husinsky W., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Nathala C., Rudenko A. A., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Treshin I. V. Enhancement of ultrafast electron photoemission from metallic nanoantennas excited by a femtosecond laser pulse //Laser Physics Letters. – 2014. – V. 11. – №. 6. – P. 065301.

28. Kolobov Y. R., Vershinina T. N., Zhidkov M. V., Golosov E. V., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V., Ligachev A. E. Structural transformation and residual stresses in surface layers of $\alpha + \beta$ titanium alloys nanotextured by femtosecond laser pulses //Applied Physics A. – 2015. – V. 119. – №. 1. – P. 241-247.

29. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Electron dynamics and prompt ablation of aluminum surface excited by intense femtosecond laser pulse //Applied Physics A. – 2014. – V. 117. – №. 4. – P. 1757-1763.

30. Bulgakova N. M., Panchenko A. N., Zhukov V. P., Kudryashov S. I., Pereira A., Marine W., Mocek T., Bulgakov A. V. Impacts of ambient and ablation plasmas on short-and ultrashort-pulse laser processing of surfaces //Micromachines. – 2014. – V. 5. – №. 4. – P. 1344-1372.

31. Бежанов С. Г., Ионин А. А., Канавин А. П., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Селезнев Л. В., Синицын Д. В., Салтуганов П. Н., Урюпин С. А. Отражение пробного импульса и термоэмиссия электронов при нагреве пленки алюминия фемтосекундным импульсом лазерного излучения //Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. – Т. 147. – №. 6. – С. 1087-1097.

32. Danilov P. A., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Rudenko A. A., Saltuganov P. N., Seleznev L. V., Yurovskikh V. I., Zayarny D. A., Apostolova T. Silicon as a virtual plasmonic material: Acquisition of its transient optical constants and the ultrafast surface plasmon-polariton excitation // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – V. 147. – №. 6. – P. 1098-1112.

33. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Салтуганов П. Н., Селезнев Л. В., Синицын Д. В. Электронная эмиссия и сверхбыстрое низкопороговое плазмообразование при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции поверхности материалов //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. – Т. 101. – №. 5. – С. 336-341.

34. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Mel'nik N. N., Saltuganov P. N., Seleznev L. V., Sinitsyn D. V. Ultrafast femtosecond laser ablation of graphite //Laser Physics Letters. – 2015. – V. 12. – №. 7. – P. 075301.

35. Nathala C. S. R., Ajami A., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Ganz T., Assion A., Husinsky W. Experimental study of fs-laser induced sub-100-nm periodic surface structures on titanium //Optics Express. – 2015. – V. 23. – №. 5. – P. 5915-5929.
36. Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Руденко А. А., Бежанов С. Г., Урюпин С. А., Канавин А. П., Емельянов В. И., Алферов С. В., Хонина С. Н., Карпеев С. В., Кучмижак А. А., Витрик О. Б., Кульчин Ю.Н. Наномасштабные процессы кипения при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции золотых пленок //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. – Т. 101. – №. 6. – С. 428-432.
37. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В., Леднев В. Н., Першин С. М. Пред-абляционная электронная и решеточная динамика поверхности кремния, возбужденной фемтосекундным лазерным импульсом //Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. – Т. 148. – №. 5. – С. 846-856.
38. Kudryashov S. I., Makarov S. V., Ionin A. A., Nathala C. S. R., Ajami A., Ganz T., Assion A., Husinsky W. Dynamic polarization flip in nanoripples on photoexcited Ti surface near its surface plasmon resonance //Optics letters. – 2015. – V. 40. – №. 21. – P. 4967-4970.
39. Агеев Э. И., Вейко В. П., Кудряшов С. И., Петров А. А., Самохвалов А. А. Контактная и бесконтактная ультразвуковая диагностика ударных волн при одноимпульсной фемтосекундной лазерной абляции поверхности титана //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2015. – Т. 102. – №. 10. – С. 785-789.
40. Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Levchenko A. O., Rudenko A. A., Saraeva I. N., Zayarny D. A., Nathala C. R., Husinsky W. Nanoscale boiling in sub-threshold surface damage and threshold-like surface spallation of bulk aluminum and gold by single femtosecond laser pulses //Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – P. 025603.
41. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Салтуганов П. Н., Селезнев Л. В., Сеницын Д. В. Сверхбыстрая электронная динамика поверхности материалов под действием интенсивных фемтосекундных лазерных импульсов //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2016. – Т. 80. – №. 4. – С. 495-495.

42. Kudryashov S. I., Ionin A. A. Multi-scale fluence-dependent dynamics of front-side femtosecond laser heating, melting and ablation of thin supported aluminum film //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 99. – P. 383-390.
43. Ageev E. I., Kudryashov S. I., Nikonorov N. V., Nuryev R. K., Petrov A. A., Samokhvalov A. A., Veiko V. P. Non-contact ultrasonic acquisition of femtosecond laser-driven ablative Mbar-level shock waves on Ti alloy surface //Applied Physics Letters. – 2016. – V. 108. – №. 8. – P. 084106.
44. Заярный Д. А., Ионин А. А., Кудряшов С. И., Макаров С. В., Кучмижак А. А., Витрик О. Б., Кульчин Ю. Н. Абляция поверхности алюминия и кремния ультракороткими лазерными импульсами варьiruемой длительности //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2016. – Т. 103. – №. 12. – С. 846-850.
45. Zayarny D. A., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Makarov S. V., Kuchmizhak A. A., Vitrik O. B., Kulchin Yu. N. Pulse-width-dependent surface ablation of copper and silver by ultrashort laser pulses //Laser Physics Letters. – 2016. – V. 13. – №. 7. – P. 076101.
46. Ionin A. A., Kudryashov S. I. Thermal melting and ablation dynamics on femtosecond laser-heated graphite surface //Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2016. – Т. 104. – №. 8. – С. 589-592.
47. Ageev E. I., Bychenkov V. Yu., Ionin A. A., Kudryashov S. I., Petrov A. A., Samokhvalov A. A., Veiko V. P. Double-pulse femtosecond laser peening of aluminum alloy AA5038: Effect of inter-pulse delay on transient optical plume emission and final surface micro-hardness //Applied Physics Letters. – 2016. – V. 109. – №. 21. – P. 211902.
48. Ионин А. А., Кудряшов С. И., Самохин А. А. Абляция поверхности материалов под действием ультракоротких лазерных импульсов //Успехи Физических Наук. – 2017. – Т. 187. – №. 2. – С. 159-172.
49. Danilov P., Ionin A., Khmel'nitskii R., Kiseleva I., Kudryashov S., Mel'nik N., Rudenko A., Smirnov N., Zayarny D. Electron-ion coupling and ambipolar diffusion in dense electron-hole plasma in thin amorphous Si films studied by single-shot, pulse-width dependent ultrafast laser ablation //Applied Surface Science. – 2017. – V. 425. – P. 170-175.
50. Kudryashov S. I., Gakovic B., Danilov P. A., Petrovic S. M., Milovanovic D., Rudenko A. A., Ionin A. A. Single-shot selective femtosecond laser ablation of multi-layered Ti/Al and Ni/Ti films: "Cascaded" heat conduction and interfacial thermal effects //Applied Physics Letters. – 2018. – V. 112. – №. 2. – P. 023103.

51. Kudryashov S. I., Saraeva I. N., Lednev V. N., Pershin S. M., Rudenko A. A., Ionin A. A. Single-shot femtosecond laser ablation of gold surface in air and isopropyl alcohol //Applied Physics Letters. – 2018. – V. 112. – №. 20. – P. 203101.
52. Kudryashov S. I., Saraeva I. N., Rudenko A. A., Ionin A. A. Broad-range ultrafast all-optical red-shifting of EUV surface plasmons: Proof-of-principle and advanced surface nanotexturing in aluminum //Applied Surface Science. – 2019. – V. 471. – P. 23-27.

Монографии, главы в научных изданиях

1. Kudryashov S. I., Melnik N. N. Structural mimicry of carbon driven by ultrashort laser pulses //Graphite: Properties, Occurrences and Uses, Nova Science Publishers, Inc. N.Y. USA, ISBN: 978-1-62618-576-0. – 2013. – P. 69-124.
2. Kudryashov S. I. Femtosecond laser excitation and ablation of silicon: basic studies //Femtosecond lasers: New research, Nova Science Publishers, Inc. N.Y. USA, ISBN: 978-1-62948-059-6. – 2013. – PP. 71-101.

Список публикаций в материалах международных конференций

1. Sokolowski-Tinten K., Kudryashov S., Temnov V., Bialkowski J., von der Linde D., Cavalleri A., Jeschke H.O., Garcia M.E., Bennemann K.H. (2000) Femtosecond laser-induced ablation of graphite, *International symposium “Ultrafast Phenomena XI”*, April 2000, USA, Springer Series in Chemical Physics **66**, 425 (Springer, Berlin).
2. Rethfeld B., Sokolowski-Tinten K., Temnov V., Kudryashov S.I., von der Linde D. Ablation dynamics of solids heated by femtosecond laser pulses, *International conference “Nonresonant Laser-Matter Interaction” (NLMI-10)*, 26 June 2000, St. Petersburg, Russia, Proc. SPIE **4423**, 186 (2001).
3. Temnov V.V., Sokolowski-Tinten K., Stojanovic N., Kudryashov S., von der Linde D., Kogan B., Weyers B., Möller R., Seekamp J., Sotomayor-Torres C. (2002) Microscopic Characterization of Ablation Craters Produced by Femtosecond Laser Pulses, *International symposium on High-Power Laser Ablation IV*, September, Taos, USA, Proc. SPIE **4760**, 1032.
4. Kudryashov S.I. (2004) Transient absorption and related structural transitions in femtosecond laser-excited silicon, *International Symposium on High-Power Laser Ablation V*, September, Taos, USA, Proc. SPIE **5448**, 1171.

5. Kudryashov S.I. (2005) Some effects affecting laser-induced damage of solid dielectrics excited by ultrashort laser pulses, *International symposium on Lasers and Applications in Science and Engineering*, March, San Jose, USA, Proc. SPIE **5710**, 120.
6. Kudryashov S.I. (2005) Dynamic interplay between fs-laser ionization mechanisms in bulk dielectrics, *International Boulder Damage symposium*, September, Boulder, USA, Proc. SPIE **5991**, 59910T.
7. Kudryashov S.I., Joglekar A., Mourou G., Ionin A.A., Zvorykin V.D., Hunt A.J. (2007) Mechanisms of femtosecond laser nanomachining of dielectric surfaces, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO-2007/ International conference on lasers, applications and technologies LAT-2007*, 28 May – 01 June, Minsk, Belarus, Proc. SPIE **6459**, 64590N.
8. Kudryashov S.I., Joglekar A., Mourou G., Ionin A.A., Zvorykin V.D., Hunt A.J. (2007) Femtosecond laser surface ablation of transparent solids: understanding the bulk filamentation damage, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO-2007/ International conference on lasers, applications and technologies LAT-2007*, 28 May – 01 June, Minsk, Belarus, Proc. SPIE **6733**, 67332H.
9. Kudryashov S.I., Kandyla M., Roeser C.A., Mazur E. (2007) Transient picometer atomic displacements in alfa-Te photoexcited by femtosecond laser pulses, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO-2007/ International conference on lasers, applications and technologies LAT-2007*, 28 May – 01 June, Minsk, Belarus, Proc. SPIE **6727**, 672709.
10. Apostolova Tz., Kudryashov S., Ionin A. (2009) Nonlocal conduction electron dynamics in femtosecond laser-excited semiconductor materials, *VI International conference on beam technologies and laser applications*, 23-25 September, St. Petersburg, Russia, Abstracts of papers, p.55.
11. Kudryashov S., Ionin A., Seleznev L., Sinitsyn D. (2010) Ultrasonic characterization of high-pressure, high-temperature transient thermodynamic states of matter during nano- and femtosecond laser ablation, *International symposium on fundamentals of laser assisted micro- and nano-technologies FLAMN-10*, 5-8 July, Pushkin, Russia, Abstracts, abstract LMI-13, p.42.
12. Apostolova Tz., Ionin A., Kudryashov S., Seleznev L., Sinitsyn D. (2010) Transient electronic effects affecting photoexcitation and energy deposition of femtosecond laser pulses in semiconductors (GaAs), *International symposium on fundamentals of laser assisted micro- and nano-technologies FLAMN-10*, 5-8 July, Pushkin, Abstracts, abstract PS1-13, p.51.

13. Kudryashov S., Ionin A., Seleznev L., Sinitsyn D. (2010) Comparative ultrasonic study of femtosecond and nanosecond laser ablation of solids, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO/International conference on lasers, applications and technologies LAT*, 23-26 August, Kazan', Russia, Conference program, p.30, abstract LMD2.
14. Kudryashov S., Ionin A., Novoselov Yu., Seleznev L., Sinitsyn D., Golosov E., Kolobov Yu., Ligachev A., Makarov S., Sharipov A. (2010) Femtosecond laser fabrication of one-dimensional surface nanogratings: transient optics of surface plasmons, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO/International conference on lasers, applications and technologies LAT*, 23-26 August, Kazan', Russia, Conference program, p.113, abstract IThO13.
15. Kudryashov S.I., Ionin A.A., Makarov S.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. (2011) Strong shock waves driven on solid surfaces by intense (sub-PW/cm²) femtosecond laser pulses, *19th International conference on Advanced laser technologies ALT-11*, 3-8 September, Golden Sands, Bulgaria, Book of abstracts, abstract P-3-UF, p.150.
16. Apostolova Tz., Kudryashov S., Ionin A., Seleznev L., Sinitsyn D., Lednev V., Pershin S., Bunkin A. (2013) Transient electronic and ablation dynamics of femtosecond laser excited semiconductors, *International symposium on fundamentals of laser assisted micro- and nano-technologies FLAMN-13*, 24-28 June, Pushkin, Russia, Abstracts, abstract LMI-10, p.36.
17. Kudryashov S., Ionin A., Seleznev L., Sinitsyn D., Lednev V., Pershin S., Bunkin A. (2013) Thermal dynamics of femtosecond laser excited silicon: heating, melting and spallation/fragmentation phenomena, *International symposium on fundamentals of laser assisted micro- and nano-technologies FLAMN-13*, 24-28 June, Pushkin, Russia, Abstracts, abstract C3-4, p.121.
18. Kudryashov S., Ionin A., Makarov S., Seleznev L., Sinitsyn D. (2013) Non-linear plasmonics on femtosecond-laser excited surfaces: transient optics of virtual plasmonic materials, *International conference on coherent and nonlinear optics ICONO/International conference on lasers, applications and technologies LAT*, 18-22 June, Moscow, Russia, Conference program, p.41, abstract NoM4J.5.
19. Kudryashov S., Gubko M., Danilov P., Ionin A., Makarov S., Rudenko A., Yurovskih V., Zayarny D., Kulchin Yu., Kuchmizhak A., Nepomnyashchii A., Savchuk A., Vitrik O., Samokhin A., Drozdiova E., Odínokov S. (2014) Laser writing of nano/microhole arrays and related features in thin metallic films: timescales and mechanisms, *15th International symposium on laser precision microfabrication LPM-2014*, 17-20 June, Vilnius, Lithuania, Technical digest, abstract Tu2-O-5, p.68.

20. Kudryashov S., Gubko M., Danilov P., Ionin A., Makarov S., Rudenko A., Seleznev L., Yurovskih V., Zayarny D., Lednev V., Pershin S., Bunkin A. (2014) Femtosecond laser surface processing: exploring spatial and temporal ablation scales for ultimate nanomachining, *15th International symposium on laser precision micro-fabrication LPM-2014*, 17-20 June, Vilnius, Lithuania, Technical digest, abstract Fr3-O-3, p.199.
21. Kudryashov S.I. (2015) High-throughput femtosecond laser nanofabrication: basic principles and prospective applications, *International conference Days on Diffraction 2015*, 25-29 May, St. Petersburg, Russia, Abstracts, p.74.
22. Kudryashov S.I., Danilov P.A., Ionin A.A., Saraeva I.N., Rudenko A.A., Zayarny D.A., Vitrik O.B., Kuchmizhak A.A., Kulchin Yu.N. (2016) Timescales in femtosecond laser nanofabrication, *17th International symposium on laser precision microfabrication LPM*, 23-27 May, Xi'an, China, Technical digest, abstract Tu2-I-5, p.84.
23. Kudryashov S., Saraeva I., Lednev V., Pershin S., Rudenko A., Ionin A. (2018) Comparative single-shot femtosecond laser ablation of solid surfaces in air and liquid environments, *11th international conference on photo-excited processes and applications ICPEPA-11*, 10-14 September, Vilnius, Lithuania, Book of abstracts, p. 138.
24. Kudryashov S.I., Danilov P.A., Nguyen L.V., Zabotnov S.V., Saraeva I.N., Busleev N.I., Rudenko A.A., Miyaji G., Ionin A.A. (2018) Manipulation by surface plasmon resonances: optical and material aspects, *International conference on ultra-fast optical science UltrafastLight-2018*, 01-05 October, Moscow, Russia, Book of abstracts, p.111.
25. Kudryashov S.I. (2018) High-throughput femtosecond laser nano- and micro-fabrication, *10th International conference on photonics and applications*, 11-15 November, Ha Long, Viet Nam, Abstracts, A-21, p.123.

Список литературы, цитируемой в автореферате

1. Shank C. V., Yen R., Hirlimann C. Time-resolved reflectivity measurements of femtosecond-optical-pulse-induced phase transitions in silicon //Physical Review Letters. – 1983. – Т. 50. – №. 6. – С. 454.
2. Downer M. C., Fork R. L., Shank C. V. Femtosecond imaging of melting and evaporation at a photoexcited silicon surface //JOSA B. – 1985. – Т. 2. – №. 4. – С. 595-599.

3. Kanavin A. P., Smetanin I. V., Isakov V. A., Afanasiev Y. V., Chichkov B. N., Wellegehausen B., Tünnermann A. Heat transport in metals irradiated by ultrashort laser pulses //Physical Review B. – 1998. – Т. 57. – №. 23. – С. 14698.
4. Fletcher L. B., Lee H. J., Döppner T., Galtier E., Nagler B., Heimann P., Fortmann C., LePape S., Ma T., Millot M., Pak A., Turnbull D., Chapman D. A., Gericke D. O., Vorberger J., White T., Gregori G., Wei M., Barbreil B., Falcone R. W., Kao C.-C., Nuhn H., Welch J., Zastra U., Neumayer P., Hastings J. B., Glenzer S. H. Ultrabright X-ray laser scattering for dynamic warm dense matter physics //Nature Photonics. – 2015. – Т. 9. – №. 4. – С. 274-279.
5. Ашитков С. И., Агранат М. Б., Канель Г. И., Комаров П. С., Фортвов В. Е. Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2010. – Т. 92. – №. 8. – С. 568-573.
6. Chichkov B. N. Momma C., Nolte S., Von Alvensleben F., Tünnermann A. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids //Applied Physics A. – 1996. – Т. 63. – №. 2. – С. 109-115.
7. Neuenschwander B., Jaeggi B., Schmid M., Hennig G. Surface structuring with ultra-short laser pulses: Basics, limitations and needs for high throughput //Physics Procedia. – 2014. – Т. 56. – С. 1047-1058.
8. Hulin D., Combescot M., Bok J., Migus A., Vinet J. Y., Antonetti A. Energy transfer during silicon irradiation by femtosecond laser pulse //Physical Review Letters. – 1984. – Т. 52. – №. 22. – С. 1998.
9. Lin Z., Zhigilei L. V., Celli V. Electron-phonon coupling and electron heat capacity of metals under conditions of strong electron-phonon nonequilibrium //Physical Review B. – 2008. – V. 77. – №. 7. – P. 075133.
10. Петров Ю. В., Иногамов Н. А., Мигдал К. П. Теплопроводность и коэффициент электрон-ионного теплообмена в конденсированных средах с сильно возбужденной электронной подсистемой //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 97. – №. 1. – С. 24-31.
11. Wang X. Y., Downer M. C. Femtosecond time-resolved reflectivity of hydrodynamically expanding metal surfaces //Optics letters. – 1992. – V. 17. – №. 20. – P. 1450-1452.
12. Seibert K., Cho G. C., Kütt W., Kurz H., Reitze D. H., Dadap J. I., Ahn H., Downer M.C., Malvezzi A. M. Femtosecond carrier dynamics in graphite //Physical Review B. – 1990. – V. 42. – №. 5. – P. 2842.

13. Sokolowski-Tinten K., von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon //Physical Review B. – 2000. – V. 61. – №. 4. – P. 2643.
14. Bauer M., Marienfeld A., Aeschlimann M. Hot electron lifetimes in metals probed by time-resolved two-photon photoemission //Progress in Surface Science. – 2015. – V. 90. – №. 3. – P. 319-376.
15. Weber S. T., Rethfeld B. Laser-excitation of electrons and nonequilibrium energy transfer to phonons in copper //Applied Surface Science. – 2017. – V. 417. – P. 64-68.
16. Rotenberg N., Bristow A. D., Pfeiffer M., Betz M., Van Driel H. M. Nonlinear absorption in Au films: Role of thermal effects //Physical Review B. – 2007. – V. 75. – №. 15. – P. 155426.
17. Me Y., Grigoropoulos C. P. Time-of-flight and emission spectroscopy study of femtosecond laser ablation of titanium //Journal of Applied Physics. – 2001. – V. 89. – №. 9. – P. 5183-5190.
18. Knoesel E., Hotzel A., Wolf M. Ultrafast dynamics of hot electrons and holes in copper: Excitation, energy relaxation, and transport effects //Physical Review B. – 1998. – V. 57. – №. 20. – P. 12812.
19. Bauer M., Aeschlimann M. Dynamics of excited electrons in metals, thin films and nanostructures //Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2002. – V. 124. – №. 2-3. – P. 225-243.
20. Spataru C. D., Benedict L. X., Louie S. G. Ab initio calculation of band-gap renormalization in highly excited GaAs //Physical Review B. – 2004. – V. 69. – №. 20. – P. 205204.
21. Glezer E. N., Siegal Y., Huang L., Mazur E. Laser-induced band-gap collapse in GaAs //Physical Review B. – 1995. – V. 51. – №. 11. – P. 6959.
22. Groeneveld R. H. M., Sprik R., Lagendijk A. Femtosecond spectroscopy of electron-electron and electron-phonon energy relaxation in Ag and Au //Physical Review B. – 1995. – T. 51. – №. 17. – C. 11433.
23. Анисимов С. И., Капелиович Б. Л., Перельман Т. Л. Электронная эмиссия с поверхностей, облученных сверхкоротким лазерным импульсом// ЖЭТФ. – 1974. – Т. 66. – С. 776-781.
24. Young J. F., Van Driel H. M. Ambipolar diffusion of high-density electrons and holes in Ge, Si, and GaAs: Many-body effects //Physical Review B. – 1982. – T. 26. – №. 4. – C. 2147.
25. Sokolowski-Tinten K., Bialkowski J., Cavalleri A., von der Linde D., Oparin A., Meyer-ter-Vehn J., Anisimov S. I. Transient states of matter during short pulse laser ablation //Physical Review Letters. – 1998. – T. 81. – №. 1. – C. 224.

26. Wu C., Zhigilei L. V. Microscopic mechanisms of laser spallation and ablation of metal targets from large-scale molecular dynamics simulations //Applied Physics A. – 2014. – Т. 114. – №. 1. – С. 11-32.
27. Ашитков С. И., Иногамов Н. А., Жаховский В. В., Эмиров Ю. Н., Агранат М. Б., Олейник И. И., Анисимов С. И., Фортов В. Е. Образование нанополостей в поверхностном слое алюминиевой мишени при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 95. – №. 4. – С. 192-197.
28. Зельдович Б., Райзер Ю. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – Рипол Классик, 2013.