

На правах рукописи

Шулепов Михаил Александрович

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО
И ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОЛИМЕРЫ
И ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Тарасенко Виктор Федотович

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Панченко Алексей Николаевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Институт
мониторинга климатических и экологических
систем СО РАН
Андреев Юрий Михайлович

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Института сильноточной электроники СО РАН
Прокопьев Владимир Егорович

Ведущая организация: Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе
СО РАН

Защита состоится «19» апреля 2012 г. В 14 час. 30 мин. На заседании
диссертационного совета Д 212.267.04 при Томском государственном университете,
по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского
государственного университета, по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «19» марта 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.267.04

Пойзнер Б.Н.

Актуальность работы. Использование лазерного излучения как инструмента взаимодействия с окружающей нас средой благодаря широкому диапазону энергетических временных и пр. характеристик позволило сделать большой шаг во многих областях науки и техники. Появилась возможность реализации новых бесконтактных методик диагностики материалов, их модификации, как то: лазерный спектральный анализ, лазерная микроскопия и оптическая томография [1-4]. Лазерное излучение позволяет сваривать, резать, спаивать различные материалы, причем с качеством швов, намного превышающим получаемые другими методами [5-8]. Благодаря лазерам стало возможным точно измерять расстояния и определять местоположения объектов [9]. Лазерное излучение используется для легирования, упрочнения материалов [8]. Оно минимизирует механическое воздействие на обрабатываемые детали и тем самым не вызывает их деформацию. Лазеры используются в химии для диагностики процессов и управления ими [10, 11]. Благодаря лазерному скальпелю резко уменьшается время регенерации тканей прооперированных органов, тем самым уменьшается время излечения больных [12]. На сегодняшний день невозможно представить микроэлектронику без лазера [13]. В общем, сегодня трудно найти область науки или техники, где, по крайней мере, не было попытки использования лазерного излучения. Однако с момента появления лазеров в связи с их универсальностью и широкими возможностями в применении лазерного излучения перед исследователями появилось необозримое поле деятельности. Многие вопросы решены, многое уже изучено, на что указывает сам факт широты использования лазерного излучения. Тем не менее, ряд проблем требует своего изучения. Так, в литературе мало работ, посвященных взаимодействию лазерного излучения с веществами, находящимися в отличных от обычного состояниях. Например, практически отсутствуют работы, в которых бы исследовался вопрос взаимодействия лазерного излучения с переохлажденными или перегретыми веществами. Действительно, на первый взгляд здесь не может возникнуть никаких вопросов, поскольку известно, что в точке воздействия лазерного излучения на материал температура может достигать десятков тысяч градусов, и потому предварительный разогрев или охлаждение вещества заведомо нивелируется воздействием лазерного излучения [14, 15]. Но, нельзя забывать, что показатель преломления, один из основных оптических параметров любого вещества, зависит от температуры, как собственно и коэффициенты теплоемкости и теплопроводности.

Также необходимо учитывать, что процесс воздействия лазерного излучения на вещество не является моментальным. Поэтому динамика процессов, происходящих в веществе, находящемся на момент воздействия лазерным излучением в отличном от нормального термодинамическом состоянии, представляет определенный интерес. А в свете того, что "нормальные условия" для различных материалов с точки зрения их применения в науке и технике, как правило, находятся в широком диапазоне температур, то исследование процессов происходящих при воздействии лазерного излучения на материалы при различных начальных температурах вещества, становится весьма актуальной задачей.

На сегодняшний день в литературе можно найти множество работ, посвященных взаимодействию лазерного излучения с полимерами [16-20]. Как правило, это работы экспериментальной направленности, но можно встретить работы теоретического плана [21]. В основном, в данных предлагаются лишь качественные модели, предлагающие возможные механизмы процессов, изучаемых при воздействии лазерного излучения на полимеры. Анализ литературных источников показал, что для расчетов процессов, происходящих при облучении полимеров лазерным излучением, обычно используют тепловые модели, в той или иной степени учитывающие химию индуцированных лазерным излучением реакций или динамику оптических параметров, например экранирование лазерного излучения продуктами выноса. Но моделей, позволяющих прогнозировать результаты воздействия лазерного излучения на полимеры на сегодняшний день нет. Поэтому такие задачи, как получение напылений частицами с заданным размером, решаются путем подбора параметров лазерного излучения и условий, при которых проводится воздействие. Отсутствие расчетных работ, по-видимому, связано с большой сложностью процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения на полимеры. Поэтому построение модели, позволяющей адекватно описывать хотя бы часть процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения на полимеры, является еще одной актуальной задачей, на решение которой направлена данная работа.

В связи с рассматриваемыми проблемами **целью работы** ставилось выявление механизмов воздействия лазерного инфракрасного и ультрафиолетового излучения наносекундной и микросекундной длительности на полимеры и металлы. В рамках данного направления НИР были сформулированы следующие **задачи**:

1. Изучение особенностей формирования микроструктур из тефлона $(-C_2F_4-)_n$ и полиметилметакрилата $(-C_5H_8O_2-)_n$ под действием излучения CO_2 -лазера при различных собственных температурах образцов.
2. Исследование динамики образования и оптических свойств продуктов лазерной абляции при действии излучения CO_2 -лазера с длительностью импульса 100 нс на полиметилметакрилат $(-C_5H_8O_2-)_n$ и полиамид-6 $(-NH-(CH_2)_5-CO-)_n$.
3. Определение физико-химических факторов, влияющих – при воздействии наносекундных импульсов УФ- и ИК-излучения – на динамику поверхности легкоплавких металлов, помещённых в различные газовые среды и вакуум.

Методы исследования. Основным методом исследования в работе является физический эксперимент, включающий в себя как измерение параметров лазерного излучения и лазерной плазмы (энергетические, временные, спектральные характеристики), так и исследование результатов воздействия лазерного излучения на материалы (измерение размеров, массы абляцированных частиц; гравиметрия кратеров, микроструктур на поверхности, подвергнутых воздействию материалов). При этом использовались стандартные методики измерений с использованием современных измерительных приборов. Для интерпретации результатов полученных в экспериментах, использовалось численное моделирование процессов, происходящих при воздействии лазерного излучения на исследуемые материалы.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Охлаждение образцов из политетрафторэтилена и полиметилметакрилата с плотностями $2,2 \text{ г/см}^3$ и $1,16 \text{ г/см}^3$ от температуры деполимеризации до -40°C , в условиях воздействия импульсного CO_2 лазера с плотностью мощности излучения $3,5 \cdot 10^4 \div 6 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ и с длительностью в единицы – десятки микросекунд уменьшает средний размер абляцированных частиц до сотен нанометров и дисперсию их размера приблизительно в 1,5 раза.
2. При фокусировании лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм, мощностью 5 МВт/см^2 , и длительностью на полувысоте 1 мкс, соответственно, на образцы из полиметилметакрилата и полиамида-6 с плотностями $1,16 \text{ г/см}^3$ и $1,15 \text{ г/см}^3$ процесс образования и разлета плазмы сопровождается двумя импульсами свечения в ультрафиолетовой и видимой области спектра. Второй импульс

свечения плазмы, возникающий через 8–10 микросекунд после окончания лазерного облучения, обусловлен процессами горения паров полимеров в кислороде, а время его появления зависит от химического состава паров.

3. В окисляющей среде (SF_6 , воздух) при воздействии на поверхность жидких металлов (In, Ga, сплав Вуда, сплав Sn-Pb) наносекундными импульсами лазерного излучения с длинами волн 337 нм и 1,06 мкм и с плотностью мощности, достаточной для образования плазмы и удаления оксидной пленки, вследствие капиллярного эффекта и последующего окисления жидкого металла на поверхности капли формируются микроструктуры из оксида металла, заполненные внутри жидким металлом. Рост микроструктур происходит от импульса к импульсу навстречу лазерному пучку, их высота достигает 5 мм, а диаметр сравним с диаметром фокусного пятна.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту, и прочих результатов

Корректность **первого** положения обусловлена:

- применением общепринятых методик измерения значений параметров лазерного излучения, плазмы абляционного факела и продуктов выноса;
- постоянным контролем постоянства условий экспериментов;
- проверкой корреляции между результатами экспериментов и давлением окружающей атмосферы, её химическим составом, химическим составом облучаемых образцов и их чистотой;
- повторяемостью результатов с высокой точностью для соответствующих серий экспериментов (разброс данных составляет менее 20%);

Правомерность **второго** и **третьего** положений обусловлена:

- применением общепринятых методик регистрации значений параметров излучения и лазерной плазмы;
- повторяемостью результатов, полученных при проведении серий экспериментов в одинаковых условиях;
- согласием экспериментальных данных с результатами численного моделирования (не хуже 10%) и данными авторов полученными в близких условиях эксперимента, представленными в [16, 17, 22].

Научная новизна

1. Обнаружено изменение размеров аблированных частиц полимеров в результате импульсного лазерного воздействия при изменении собственной температуры образцов [2003 г.].
2. Обнаружено, что импульс свечения лазерно индуцированной плазмы на поверхности полимеров полиметилметакрилата и полиамида-6 состоит из двух последовательных пиков [2006 г.].
3. Обнаружено формирование микроструктур при многоимпульсном воздействии лазерного излучения УФ- и ИК- диапазона наносекундной длительности на жидкие металлы в присутствии химически активных газов [2011 г.].
4. Сделано предположение о механизмах появления второго пика импульса свечения лазерно-индуцированной плазмы на поверхности полимеров.
5. Определен механизм формирования микроструктур на поверхности жидких металлов под действием импульсного лазерного излучения УФ- и ИК- диапазона.

Научная ценность

1. Результаты исследований воздействия лазерного излучения на полимеры в атмосферах различных газов позволили более точно описать природу процесса образования и развития плазмы на поверхности полиметилметакрилата и полиамида-6.
2. Выдвинуто предположение, что изменение количества продуктов абляции и размер аблированных частиц при изменении исходной температуры мишени определяются существенным влиянием температуры полимеров на их оптические характеристики и как следствие, на энергию лазерного излучения поглощаемую полимером (до начала плазмообразования).
3. Сделано предположение, что появление второго пика импульса свечения лазерно-индуцированной плазмы на поверхности полиметилметакрилата и полиамида обусловлена химическими реакциями продуктов абляции с воздухом атмосферы.
4. Показано, что формирование микроструктур на поверхности жидких металлов под действием импульсного лазерного излучения является результатом роста

капилляра со стенками из оксидов (фторидов, нитридов) металла возникающих за счет взаимодействия чистого металла с окружающим газом.

Практическая значимость

Первое защищаемое положение и результаты, с ним связанные, позволяют создавать мелкодисперсионные полимерные порошки, тонкие однородные покрытия, а также варьировать глубину обработки полимеров лазерным излучением.

Вытекающие из **третьего** положения и результатов, с ним связанных, представления о механизмах взаимодействия импульсного лазерного излучения с жидкими металлами позволяют создавать микрорельеф заданной конфигурации на поверхности металлов.

Апробация. Основные результаты работы опубликованы в российских и зарубежных научных журналах, докладывались на Всероссийских и Международных конференциях:

Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (Moscow, Russia 2002), CLEO/Europe (Munich, Germany, 2003), XII Международная конференция по методам аэрофизических исследований (Новосибирск Россия, 2004), High-power laser ablation (Taos, USA, 2004), III Всероссийская конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине» (Новосибирск, Россия, 2009), XLVII Международная научная студенческая конференция "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, Россия, 2009), 10-th International Conference on Laser Ablation (Singapore, 2009), LAT 2010: International Conference on Laser, Applications and Technologies (Kazan, Russia, 2010), XVIII International Symposium on Gas Flow, Chemical Lasers and High-Power Lasers (2010, Sofia, Bulgaria), International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Tomsk, Russia, 2004, 2006, 2008, 2010), Международная конференция Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул – AMPL (Томск, Россия, 2003, 2005, 2007, 2009)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, включая 3 публикации в журналах из списка ВАК

Личный вклад. Результаты, представленные в диссертации, получены лично автором либо при непосредственном его участии. Автор участвовал в постановке задач, выборе методов, подготовке и проведении экспериментов, а также обработке и интерпретации результатов экспериментов. На основании экспериментальных данных, полученных автором, и с его участием в постановке задач и анализе результатов в Институте теплофизики СО РАН Н.М. Булгаковой, И.М. Бураковым и Л.А. Захаровым были проведены численные моделирования процессов лазерной абляции полиметилметакрилата и динамики микроструктур на поверхности жидких металлов под действием лазерного излучения.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений с таблицами обозначений и сокращений. Работа изложена на 151 страницах, содержит 6 таблиц, включает библиографический список из 198 наименований, иллюстрирована 41 рисунком.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, а также новизна, научная и практическая значимость.

В **первой главе** дано описание экспериментальных установок, используемых при исследованиях. Установки построены на основе схемы (рисунок 1) с использованием CO₂ лазеров "ЛИДА", "Фотон-2" и "МИГ-1" (Лаборатория оптических излучений, ИСЭ СО РАН), а также Nd:YAG лазера LQ129 (Solar Laser Systems, Беларусь). "Фотон – 2" и "ЛИДА" относятся к ТЕА лазерам, "МИГ-1" является электро-ионизационным лазером

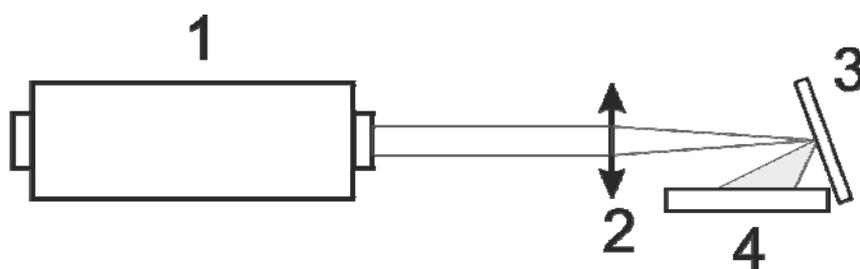


Рисунок 1. Принципиальная схема базовой установки для воздействия лазерного излучения на материалы. 1-лазер, 2-фокусирующая линза, 3-образец, 4-подложка для напыления.

В зависимости от задачи исследований, установка дополнялась различным оборудованием для регистрации параметров лазерного излучения, изменения внешних условий, среды, в которой предполагалось проводить воздействие и т.д. Глава состоит из параграфов, в каждом из которых описаны установки, которые использовались в соответствующих сериях экспериментов, результаты которых представлены в последующих главах. Энергетические и временные характеристики лазеров даны в таблице 1:

Таблица 1. Параметры лазеров.

	λ , м	$\tau_{1/2}$, с	$Q_{\text{имп}}$, Дж	$\nu_{\text{чпи}}$, Гц
Фотон – 2 – N ₂	$337 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$250 \cdot 10^{-6}$	моноимпульс
Фотон – 2 – CO ₂	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$28 \cdot 10^{-9}$	0,23	до 4
ЛИДА – CO ₂	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-9} \div 1 \cdot 10^{-6}$	6	моноимпульс
МИГ-1 – CO ₂	$10,6 \cdot 10^{-6}$	$100-1500 \cdot 10^{-9}$	6-35	до 25
МИГ-1 – ArXe	$1,73 \cdot 10^{-6}$	$320 \cdot 10^{-9}$	0,01-0,015	до 25
LQ129	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$250 \cdot 10^{-6}$	до 500

Так же в главе представлено оборудование и описаны методики, используемые для анализа результатов экспериментов.

Во **второй** главе представлены результаты экспериментов по воздействию излучения CO₂ лазера на тефлон (C₂F₄)_n при различных температурах [*1-*7].

Показана зависимость количества аблированного вещества от температуры (рисунок 2).

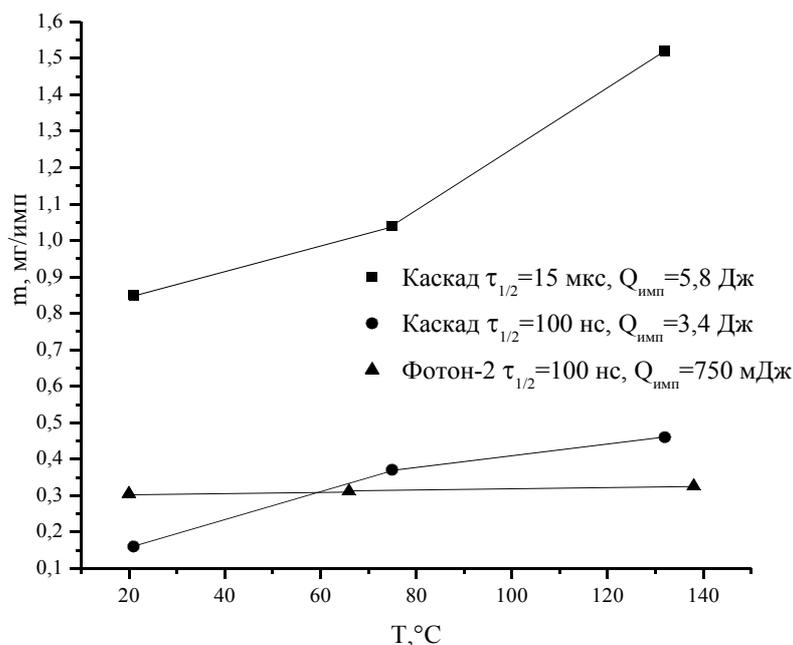


Рисунок 2. Удельная масса аблированного вещества в зависимости от температуры.

Приведены результаты анализа распределения частиц, напыленных на кварцевые пластины в результате воздействия, на основе которых получена зависимость среднего размера частиц от температуры образцов, при которой проводилось облучение (рисунок 3).

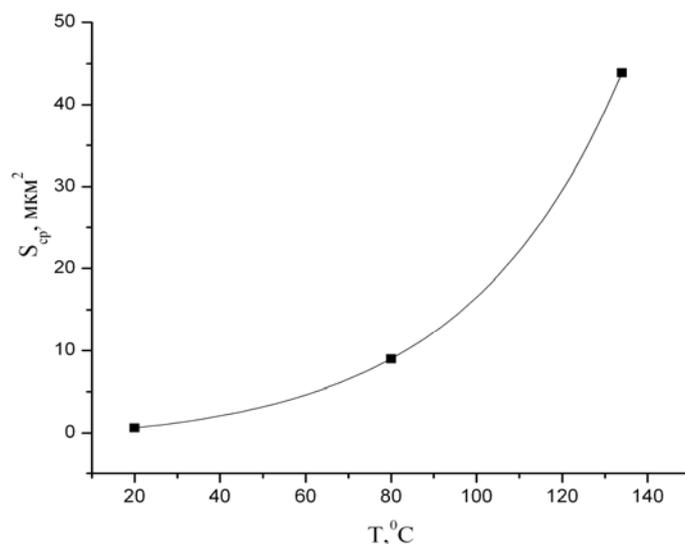


Рисунок 3. Зависимость среднего размера частиц тефлона, напыленных на подложку от температуры образца под действием излучения установки.

Третья глава посвящена исследованию воздействия ИК лазерного излучения на полиметилметакрилат $(\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2)_n$ и полиамид-6 $(\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{CO})_n$.

В главе представлены результаты по динамике плазменного факела, возникающего над поверхностью исследуемых материалов (рисунок 4).

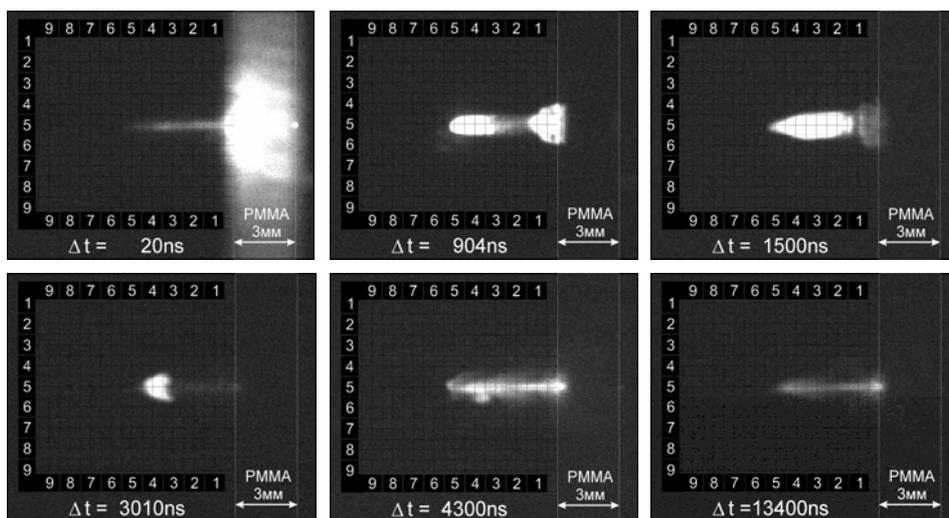


Рисунок 4. Динамика свечения плазмы над поверхностью ПММА.

Показано, что формирование плазмы при лазерной абляции ПММА резко снижает эффективность абляции и напыления полимерных пленок вследствие активного экранирования мишени и сгорания значительной части продуктов абляции в плазменном факеле. Результаты эксперимента по регистрации спектров плазмы, возникающей на поверхности ПММА и полиамида-6, подтверждают этот вывод (рисунок 5).

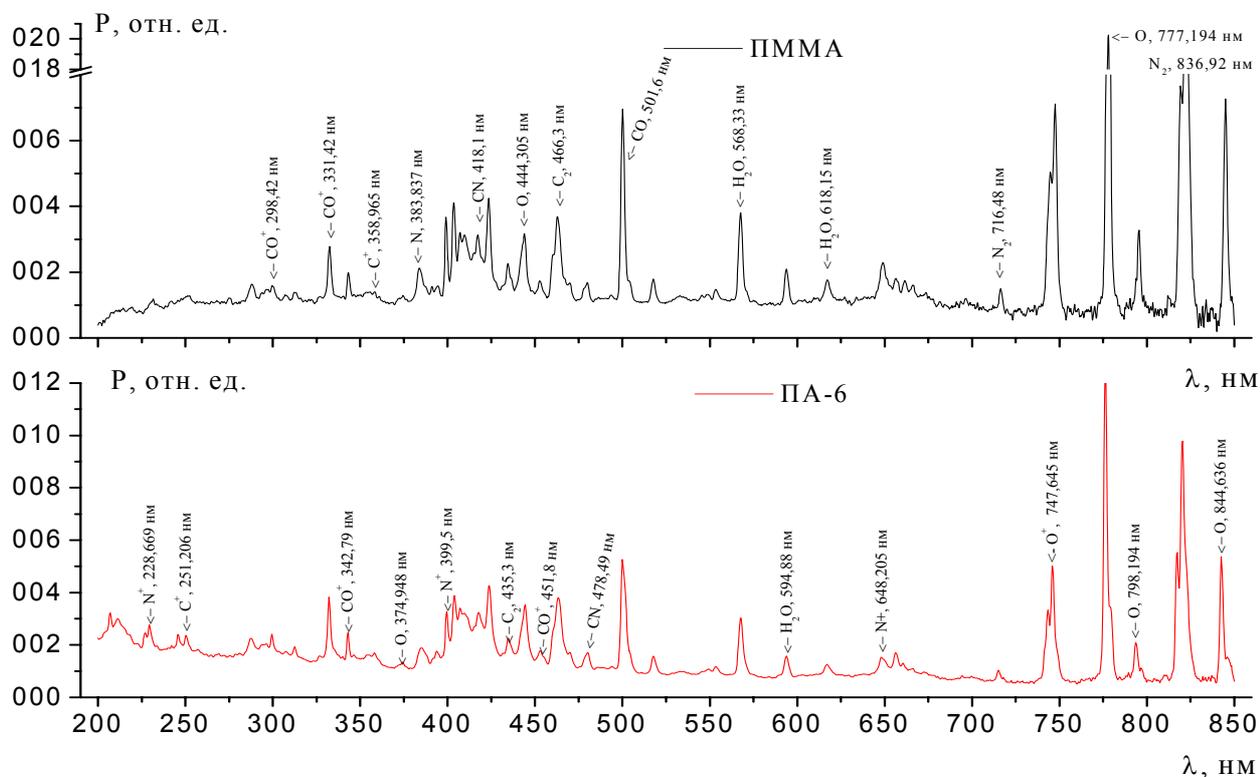


Рисунок 5. Спектр излучения плазменного факела при воздействии импульсного излучения CO₂- лазера на ПММА и полиамид-6 в воздухе.

Изучена динамика свечения плазменного факела на отдельных спектральных линиях (рисунок 6).

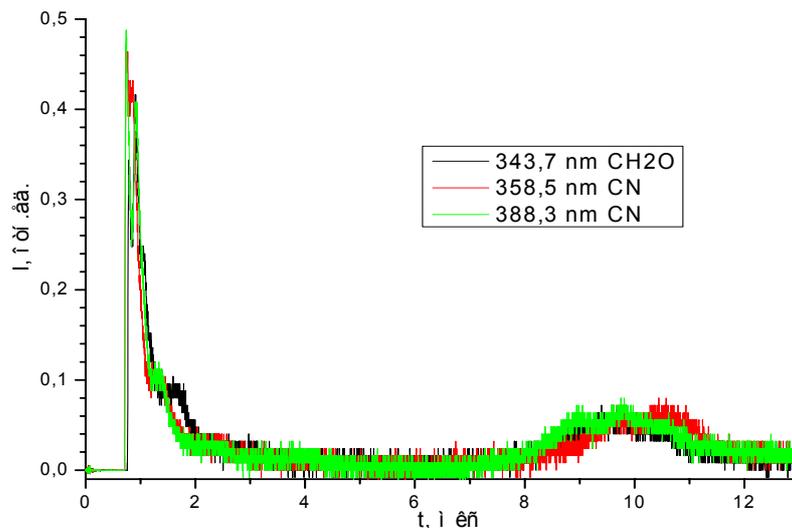


Рисунок 6. Осциллограммы свечения плазменного факела на спектральных линиях циана (CN) и формальдегида (CH₂O) при воздействии на ПММА излучения CO₂ лазера в воздухе.

Также в этой главе приводятся результаты моделирования процессов происходящих в плазменном факеле при воздействии излучения CO₂ лазера на поверхность пластика. Моделирование процессов проводилось научной группой Н.М. Булгаковой при участии автора диссертации в постановке задачи, разработке модели и анализе результатов.

В основе hfcxtnjd была положена фотометрическая модель [23] с учетом экранирования лазерного излучения плазмой, образующейся в приповерхностной области облучаемого на воздухе материала. Согласно этой модели, ослабление света при прохождении через плазму можно представить в виде

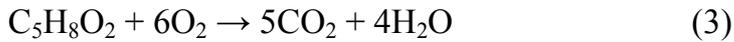
$$I(t) = I_0(t) \exp(-\Lambda(t)) \tag{1}$$

Коэффициент затухания $\Lambda(t)$ вычисляется из разложения Унзольда-Крамерса в виде:

$$\Lambda(t) = a\Delta x(t) + bE_a(t), \tag{2}$$

где $\Delta x(t)$ и $E_a(t)$ – глубина абляции и лазерная энергия, поглощенная в плазме факела к моменту времени t . Параметры a и b учитывают длину оптического пути через плазму и эффект роста поглощения из-за нагрева плазмы, соответственно.

Предполагалось, что нагрев плазмы может быть обусловлен не только поглощением, но также из-за экзотермической реакции горения паров ММА (метилметакрилата), которая может быть записана в виде



Для запуска реакции (3) необходима энергия активации $E_g = 175,5$ кДж/моль, тогда как теплота сгорания $Q_c = 2520$ кДж/моль. Следовательно, вместо $E_a(t)$ в коэффициенте затухания $\Lambda(t)$ (2), необходимо использовать полную энергию нагрева плазмы $E_{pl} = E_a + E_{com}$ где E_{com} – энергия, выделяемая в факеле в результате реакции горения. Энергия излучения, поглощенная в плазме факела к моменту времени t , рассчитывалась как

$$E_a = \int_0^t I_0(t)(1 - \exp(-\Lambda(t))) dt ,$$

$$E_{com} = L_{pl} \cdot Q_c \int_0^t \omega_c \cdot dt \quad (4)$$

Удельная теплота сгорания может быть выражена как

$$\partial e_{com} / \partial t = Q_c \omega , \quad (5)$$

где ω – вероятность реакции (3)

$$\omega = A_g \rho_{MMA} n_{O_2} \exp(-E_g / R_G T) \quad (6)$$

здесь $A_g = 4,9 \times 10^{17}$ см³/(моль·с), ρ_{MMA} – плотность паров ММА, R_G – газовая постоянная. Для простоты считалось, что из-за эффективного перемешивания концентрация кислорода постоянна и равна $n_{O_2} = 0.2095 n_{air}$. Плотность ММА оценивалась по глубине абляции Δz , достигнутой к моменту времени t

$$\rho_{MMA} = (\rho_{PMMA} \Delta z / L_{pl} - M_{MMA} \int_0^t \omega dt) , \quad (7)$$

(т.е. испаренная масса за вычетом сгорания). Здесь L_{pl} – толщина плазмы. Так как ρ_{MMA} и ω – взаимозависимые переменные, пары, сгоревшие к моменту времени t определялись из (6) из предыдущего шага по времени, как

$$\int_0^t \omega dt = A_g n_{O_2} \int_0^t \rho_{MMA} \exp(-E_g / RT) dt . \quad (8)$$

Во время лазерного импульса границу факела можно считать расширяющейся с тепловой скоростью, определяемой максимальной температурой поверхности ($T_s^{\max} \sim 700 \text{ K}$), так что $L_{pl} = v_{th}t$.

На основе модельных уравнений экранирования (1)-(8), для экспериментальных значений параметров облучения рассчитана динамика абляции ПММА и получены основные особенности процесса абляции. Из-за низких теплопроводности и теплоты испарения ПММА наблюдается сильный перегрев поверхностного слоя, достигающий 800 К (рисунок 7). Температура мишени остается высокой в течение длительного времени после окончания лазерного импульса, что означает наличие испарения в течение десятков микросекунд.

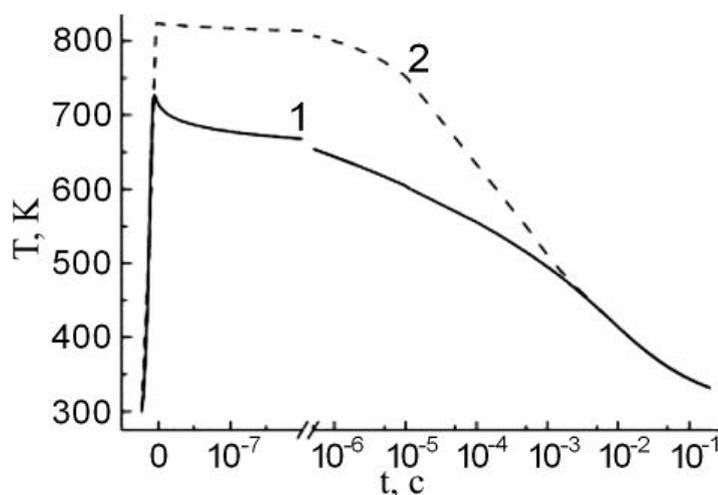


Рисунок 7. Динамика температуры поверхности образца ПММА (1) и максимальной температуры образца (2). $Q = 37 \text{ Дж/см}^2$.

Согласно расчетам, только небольшая часть лазерной энергии достигает мишени, а остальное излучение поглощается в плазме (рисунок 8). Однако в вакууме глубина абляции увеличивается. Отсюда следует, что такое сильное экранирование не может быть объяснено радиационным поглощением на колебательных переходах молекулы ММА и самоподдерживающимся горением пара ММА.

Таким образом, в результате экспериментов по воздействию ИК лазерного излучения на полиметилметакрилат и полиамид-6, а также моделирования процессов лазерной абляции данных материалов был установлен факт химической природы плазмы индуцированной лазерным излучением [*8-*12].

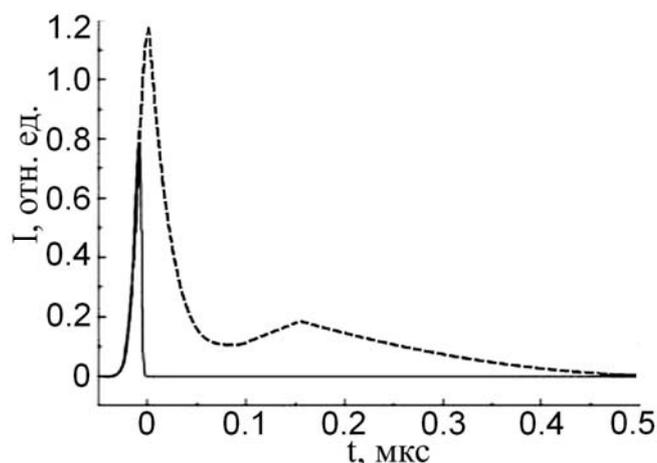


Рисунок 8. Форма лазерного импульса (пунктир) и часть импульса, достигающая поверхности мишени после поглощения в плазме (сплошная линия).

В **четвертой главе** описывается новое явление, впервые зарегистрированное нами при воздействии излучения азотного и Nd:YAG лазера на поверхность жидких металлов [*13].

Представлены результаты исследований по воздействию лазерного излучения на Ga, In, сплав Вуда и припой (сплав SnPb) в жидком состоянии. Показано, что рост микроструктур (рисунок 9) обусловлен в первую очередь наличием воздуха в области воздействия, в результате чего происходит окисление металла и формирование микроструктур.

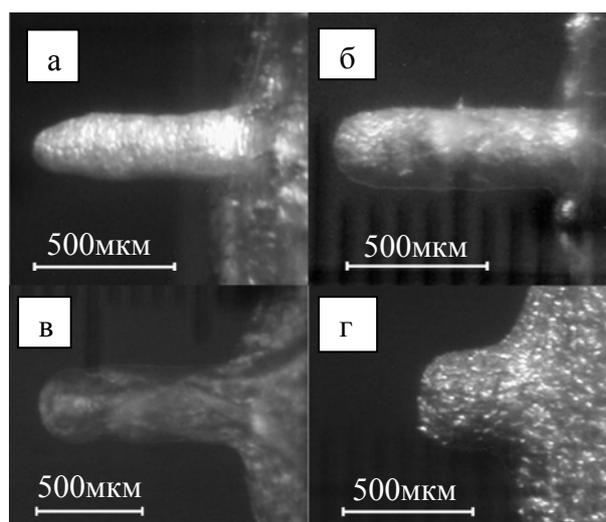


Рисунок 9. Микроструктуры, образовавшиеся в воздухе после 200 импульсов Nd:YAG лазера на поверхность Ga (а), In (б), сплава Вуда (в), и Sn-Pb сплава (г).

Рассмотрены различные процессы, влияющие на рост микроструктур, в частности, температура металла, при которой проводится облучение. Приведены результаты исследования химического состава поверхности микроструктур и поверхности жидкого металла, в результате чего был сделан вывод о решающем влиянии окисляющей атмосферы на формирование микроструктур.

Также в этой главе приведены результаты моделирования процесса воздействия лазерного излучения на поверхность жидких металлов. Моделирование проводилось в группе Н. М. Булгаковой при участии автора в анализе результатов моделирования.

Для определения глубины лазерной абляции использовалась тепловая модель нестационарного испарения материала, широко используемая для описания процессов лазерной абляции вещества [24-43, *14,*16]. В расчетах не учитывалось экранирование лазерного излучения продуктами абляции и плазмой. Модель использовалась в предположении, что при экспериментальных интенсивностях излучения реализуется механизм поверхностного испарения металла. Алгоритм представлен ниже.

Скорость фронта испарения (скорость абляции) v определялась из уравнения Герца-Кнудсена

$$v(T_s) = \frac{0.82}{\rho} \left(\frac{m}{2\pi k T_s} \right)^{1/2} p_s(T_s), \quad (1)$$

где $p_s(T_s)$ – давление насыщенного пара при температуре поверхности T_s , для нахождения которого применялось уравнение Клайперона –Клаузиуса:

$$p_s(T_s) = p_b \exp\left(\frac{L}{k} \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_s} \right) \right), \quad (2)$$

где L –теплота испарения, T_b – температура кипения при нормальных условиях. Температура поверхности T_s находилась решением одномерного нестационарного уравнения теплопроводности, которое описывает распределение температуры $T(z, t)$ в глубину мишени, в системе координат, связанной с движущимся фронтом лазерной абляции, и имеющего вид:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} - v(t) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + (1 - R(T_s)) \alpha_b I(t) \exp(-\alpha_b z), \quad (3)$$

со следующими граничными условиями

$$T(z,0) = T_0, \quad T(0,t) = T_s(t), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = Lv(t), \quad (4)$$

где c , λ и α_b – теплоемкость, коэффициент теплопроводности и коэффициент поглощения данного металла соответственно. $R(T_s)$ – коэффициент отражения поверхности металла. T_0 – начальная температура окружающей жидкий металл среды.

На рисунке 10, представлены результаты моделирования для жидкого галлия ($T_0 = 30^\circ\text{C}$), облученного импульсом Nd:YAG лазера.

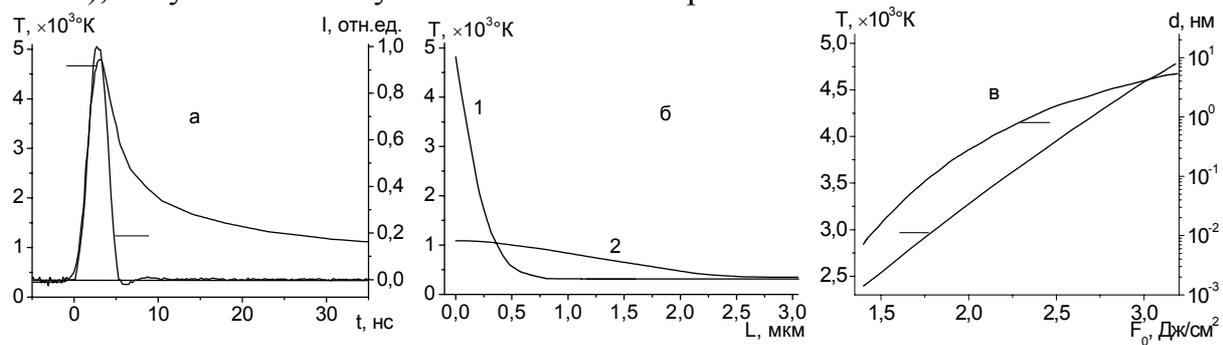


Рисунок 10. Результаты расчетов по тепловой модели для мишени из жидкого галлия ($T_0=30^\circ\text{C}$) при облучении импульсами Nd:YAG лазера:

- (а) зависимость температуры поверхности от времени для $F_0 = 3,2 \text{ Дж/см}^2$ и импульс лазерного излучения;
- (б) профили температуры в глубину мишени в момент времени, когда достигается максимальная температура поверхности (1) и через 35 нс после максимума интенсивности лазерного импульса (2).
- (в) максимальная температура поверхности и глубина абляции в зависимости от удельной энергии падающего лазерного излучения.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы, обсуждается ее научная и практическая ценность.

Основные результаты диссертационной работы:

1. На базе ТЕА CO_2 -лазера "Фотон-2" создана экспериментальная установка "Вика-1000" для воздействия импульсным лазерным излучением на различные материалы в различных газовых средах.
2. Исследованы процессы лазерной абляции политетрафторэтилена и полиметилметакрилата импульсным лазерным CO_2 -излучением при различной собственной температуре мишени.

3. Установлено влияние исходной температуры полимера на размер вещества, аблированного в результате воздействия лазерного излучения.
4. Исследованы процессы плазмообразования на поверхности полиметилметакрилата и полиамида при импульсном лазерном воздействии излучением CO₂-лазера.
5. Показано, что при воздействии импульсами излучения CO₂-лазера на поверхность полиметилметакрилата и полиамида в продуктах выноса возникает плазма, которая имеет два последовательных пика интенсивности свечения.
6. Исследованы процессы образования микрорельефа на поверхности жидких металлов под действием импульсного лазерного ИК- и УФ- излучения.
7. Установлены оптимальные режимы воздействия импульсного ИК- и УФ- лазерного излучения на поверхность жидких металлов для получения микроструктур.
8. Показано, что основное влияние на формирование микроструктур оказывает химический состав атмосферы (способность к окислению поверхности металла), в которой происходит воздействие.

Список цитируемой литературы

1. Менке Г., Менке Л. Введение в лазерный эмиссионный микроспектральный анализ. – М.: Мир, 1968. – 250 с.
2. Inoue S., Inoue T. Direct-view high-speed confocal scanner: the CSU-10 // *Methods in Cell Biology*. – 2002. – Vol.70. – P.87-127.
3. Hell S.W., Booth M., Wilms S., and etc. Two-photon near- and far-field fluorescence microscopy with continuous-wave excitation // *Opt. Lett.* – 1996. – Vol.23. – P.1238-1240.
4. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н. Оптическая томография: научное издание. – М.: Радио и связь. 1989. – 224 с.
5. Астапчик С.А., Маклаков А.Г., Голубев В.С. Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке. – Минск: Белорусская наука, 2008. – 252 с.

6. Игнатов А.Г., Козлов А.В., Скрипченко А.И. и др. Лазерная сварка со сквозным проплавлением сталей различных классов // Автоматическая сварка. – 1987. – № 9. – С.26-29.
7. Черпаков Б. И., Альперович Т. А. Металлорежущие станки. Учебник для нач. проф. образования. – Академия, 2003. – 368 с.
8. Бирюков В. П. Промышленное применение CO₂-лазеров для наплавки, упрочнения деталей и точного раскроя листового материала // Тяжелое машиностроение. – 2006. – N 4. – С. 25-28
9. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. — СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – 232 с.
10. Летохов В. С. Селективное действие лазерного излучения на вещество // Успехи физ. Наук. – 1978. – Т. 125. – Вып.1. – С. 57-96
11. Сэм М. Ф. Лазеры и их применения // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 92-98.
12. Александров М.Т. и др. Применение лазеров в медицине. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. – С.9-15
13. Сайт ООО НПФ «Микротехнология», Основные направления деятельности <http://microtechnologia.ru/technology>
14. Райзер Ю.П. Лазерная искра и распространение разрядов.– М.: Наука, 1974.– 308с.
15. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах / Под ред. Прохорова А.М. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
16. Виноградов Б.А. Лазерная деструкция полимеров. – Владивосток: Даль-наука, 1995. – 201с.
17. S. Baudach, J. Bonse, W. Kautek Ablation experiments on polimide with femtosecond laser pulse // Applied Physics A. – 1999. – Vol.69. – P.395-398.
18. Лоткова Э.Н., Волошин-Челпан Э.К. Воздействие ИК лазерного излучения на полимер политетрафторэтилен // Физика и химия обработки материалов. – 2010. – №4. – С.9-11

19. Красовский А.М., Толстопятов Е.М. Получение тонких пленок распылением полимеров в вакууме. – Минск: Наука и техника, 1989. – 181с.
20. Hopp B., Geretovszky Zs., Bertoti I., Boyd I.W. Comparative tensile strength study of the adhesion improvement of PTFE by UV photon assisted surface processing // *Applied Surface Science*. – 2002. – Vol. 186. – pp. 80-84.
21. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // *Успехи физических наук*. – 2002. – Т. 172. – № 3. – С. 301–333.
22. Бункин Ф.В., Конов В.и., Прохоров А.М., Федоров В.Б. Лазерная искра в режиме "медленного горения" // *Письма в ЖЭТФ*. – 1969. – Т.9. – Вып.2. – с.609-612.
23. Булгаков А.В., Булгакова Н.М. Тепловая модель импульсной лазерной абляции в условиях образования и нагрева плазмы, поглощающей излучение. // *Квантовая электроника*. – 1999. – Т. 27. – №. 5. – Р. 154–158.
24. Bulgakova N.M., Zakharov L.A., Onischuk A.A. and etc. Thermal and gasdynamic analysis of ablation of poly(methyl methacrylate) by pulsed IR laser irradiation under conditions of nanoparticle formation // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2009. – Vol.42. – №6. – Paper 065504.
25. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. – М.: Наука, 1970.
26. Singh R.K., Narayan J. Pulsed-laser evaporation technique for deposition of thin films: physics and theoretical model // *Phys. Rev. B*. – 1990. – Vol.41. – №13. – pp.8843-8859.
27. H. Schittenhelm, G. Callies, P. Berger, H. Hugel. Investigations of extinction coefficients during excimer laser ablation and their interpretation in terms of Rayleigh scattering // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1996, Vol. 29, p. 1564-1575.
28. Singh R.K., Viatella J. Estimation of plasma absorption effects during pulsed laser ablation of high-critical-temperature superconductors // *J. Appl. Phys.* – 1994. – Vol. 75. – №. 2 – pp. 1204-1206.
29. Tokarev V.N., Lunney J.G., Marine W., Sentis M. Santis. Analytical thermal model of ultraviolet laser ablation with single-photon absorption in the plume // *J. Appl. Phys.* – 1995. – Vol. 78. – No. 2. – pp. 1241-1246.

30. Fähler S., Krebs H.-U. Calculations and experiments of material removal and kinetic energy during pulsed laser ablation of metals // *Appl. Surf. Sci.* – 1996. – Vol. 96-98. – pp. 61-65.
31. Giardini Guidoni A., Kelly R., Mele A., Viotello F. Heating effects and gas-dynamic expansion of the plasma plume produced by irradiating a solid with laser pulses // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 1997. – Vol. 6. – No. 3. – pp. 260-269.
32. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1996.
33. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
34. Басов Н.Г., Бойко В.А., Семенов О.Г., Крохин О.Н., Склизков Г.В. Уменьшение коэффициента отражения мощного лазерного излучения от поверхности твердого вещества // *ЖТФ.* – 1968. – т. 38. – № 11. – стр. 1973-1975.
35. Мартынюк М.М. Взрывной механизм разрушения металлов мощным потоком электромагнитного излучения // *ЖТФ.* – 1976. – Т. 46. – вып. 4. – с. 741-746.
36. О.Н. Крохин. Самосогласованный режим нагревания плазмы излучением оптического генератора // *ЖТФ.* – 1964. – т. 34. – № 7. – С. 1325-1327.
37. Schmidt H., Ihlemann J., Wolff-Rottke B., Luther K., Troe J. Ultraviolet laser ablation of polymers: spot size, pulse duration and plume attenuation effects explained // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 83. – pp. 5458-5468.
38. Батанов В. А., Бункин Ф.В., Прохоров А.М., Федоров В.Б. Самофокусировка света в плазме и сверхзвуковая волна ионизации в луче лазера // *Письма в ЖЭТФ.* – 1972. – Том 16. – № 7. – С. 378-382.
39. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В., Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. – Ленинград: Химия, 1984 – 216 с.
40. Miotello A.B, and Kelly R. Laser-induced phase explosion: new physical problems when a condensed phase approaches the thermodynamic critical temperature // *Applied Physics A* – 1999. – Vol.69. – Suppl. 1 – P. S67-S73.
41. Palik, E. D. (Ed.). *Handbook of Optical Constants of Solids.* – Academic Press, Orlando FL, 1998. – 999 p.
42. Bovatsek J., Tamhankar A., Patel R, Bulgakova N.M., and Bonse J. “Effects of pulse duration on the ns-laser pulse induced removal of thin film materials used in photovoltaics // *Proceedings of SPIE.* – 2009. – Vol. 7201. – Paper No. 720116. – 13 pages.

43. Пекшева Н.П., Струков В.М. Кинетика и катализ реакций оксидирования титана, кремния, германия и арсенида галлия // Успехи химии. – 1979. – Т. 48. – № 11. – С. 2034-2060.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

- *1. Fedenev A.V., Goncharenko I.M., Koval' N.N., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Alekseev S.B., Shulepov M.A. Study on Interaction of pulse-periodical IR-Laser radiation with polymers // Thes. of The Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT). Moskow. – 2002.
- *2. Fedenev A.V., Alekseev S.B., Orlovskii V.M., Shulepov M.A., Tarasenko V.F. Teflon sputtering under pulsed CO₂-laser irradiation // Thes. of Int. Conf. CLEO/Europe-2003 (22-27 June 2003, Munich, Germany): Europ. Conf. Abst.- 2003
- *3. Fedenev A.V., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Alekseev S.B., Shulepov M.A. Study on interaction of pulse-periodical CO₂ and Xe atomic laser radiation with teflon and vinypros. Proceedings of SPIE. – 2003. – V.5121. – P.118 – 125.
- *4. Fedenev A.V., Alekseev S.B., Goncharenko I.M., Koval N.N., Lipatov E.I., Orlovskii V.M., Shulepov M.A., and Tarasenko V.F. UV and IR Laser Radiation's Interaction with Metal Film and Teflon Surfaces // Laser and Particle Beams. – 2003. – Vol.21. – No.2. – P.265 – 272.
- *5. Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Шулепов М.А. Получение наночастиц политетрафторэтилена при криогенных температурах // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т.17. – № 2-3. – с.179-182
- *6. Шулепов М.А., Орловский В. М., Тарасенко В. Ф., Феденев А. В. Исследование воздействия излучения CO₂-лазера на политетрафторэтилен при различных температурах образцов // Proceedings of ICMAR, Part. III. – 2004– Novosibirsk. –, pp. 161-164
- *7. Shulepov M.A., Orlovskii V.M., Tarasenko V.F., Fedenev A.V. Temperature dependence of teflon transmission factor under TEA -CO₂ laser irradiation // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5448. – Part II. – P.1114 – 1118.

- *8. Shulepov M.A., Bulgakova N.M., Zakharov L.A., Panchenko A.N., Action of pulsing IR laser radiation on poly(methyl methacrylate) at various pressures // Proceedings of IX Int. Conf. "Atomic and Molecular Pulsed Lasers". – Tomsk. – 2009. – P. 73.
- *9. Zakharov L.A., Shulepov M.A., Bulgakova N.M. Laser plasma of poly(methyl methacrylate) in air: Modeling and experiment // Proceedings of IX Int. Conf. "Atomic and Molecular Pulsed Lasers". – Tomsk. – 2009. – P. 100-111.
- *10. Захаров Л.А., Булгакова Н.М., Шулепов М.А., Модель формирования плазмы при импульсной лазерной абляции полиметилметакрилата // Сборник статей III Всероссийской конф. «Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине». – 2009. – Новосибирск. С. 67-68.
- *11. Захаров Л.А., Шулепов М.А. Модель образования плазмы в процессе импульсной лазерной абляции полиметилметакрилата // Сборник тезисов, XLVII МНСК. – 2009. – Новосибирск. –С. 246.
- *12. Zakharov L.A., Bulgakova N.M., Tel'minov A.E., Panchenko A.N., and Shulepov M.A., Laser plasma of poly (methyl methacrylate) in air: modeling and experiment // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol. 7751. – Paper№77511L. – 10 pages
- *13. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Шулепов М.А. и др. Исследование влияния лазерной абляции на формирования механического импульса плазмы капиллярного разряда // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – № 3. – С. 53.
- *14. Panchenko A.N., Bulgakova N.M., Tel'minov A.E., and Shulepov M.A. Formation of microstructure on liquid metal surface under nanosecond laser ablation // Proceedings of SPIE. – 2010. – V. 7751. – №77511W. – 10 pages.
- *15. Bulgakova N.M., Panchenko A.N., Tel'minov A.E. and Shulepov M.A. Formation of microtower structures on nanosecond laser ablation of liquid metals // Applied Physics A. – 2010. – Volume 98. – Number 2 – Pages 393-400.
- *16. Panchenko A.N., Shulepov M.A., Tel'minov A.E., Zakharov L.A., Paletsky A.A., Bulgakova N.M. Pulsed IR laser ablation of organic polymers in air: shielding effects and plasma pipe formation // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44. – №38. – № 385201. – 7pages.

Тираж 100. Заказ

Институт сильноточной электроники СО РАН.

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.