

На правах рукописи



Рогалин Владимир Ефимович

**СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ СИЛОВОЙ
ОПТИКИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ
ИМПУЛЬСОВ ИЗЛУЧЕНИЯ CO₂ – ЛАЗЕРОВ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Тверь – 2016

Работа выполнена на кафедре прикладной физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственной университет» и в акционерном обществе «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Каплунов Иван Александрович

Официальные оппоненты: **Горбунов Александр Васильевич**, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт физики твердого тела Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории оптической прочности и диагностики кристаллов

Исаев Владислав Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», профессор кафедры физики и информационных систем

Глезер Александр Маркович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», ведущий научный сотрудник кафедры физического материаловедения

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится 20 октября 2016 г. в 12.30 час. на заседании диссертационного совета Д 212.263.09 при Тверском государственном университете по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТвГУ по адресу: 170000, г. Тверь, ул. Володарского, 44а и в сети Интернет на сайте ТвГУ <http://dissertations.tversu.ru/>

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.263.09

Барабанова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Лазеры, пятидесяти пятилетие появления которых недавно отмечалось мировой общественностью, стали настолько актуальны практически во всех областях науки и техники, что уже трудно представить, как можно без них обойтись. Развитие лазерной техники стимулировало бурный рост исследований во многих областях фундаментальной и прикладной науки, из которых хотелось бы особо отметить нелинейную оптику и физику конденсированного состояния.

Мощные лазерные системы на CO_2 , способные генерировать излучение на нескольких десятках линий в области $9 \div 11$ мкм, самой сильной из которых является 10,6 мкм, широко применяются в лазерных технологиях обработки материалов, медицине, для стимулирования химических реакций, разделения изотопов, для оптической накачки лазеров дальнего ИК – и терагерцового диапазонов и т.д. [1-5]. Так как излучение CO_2 – лазеров находится в окне прозрачности атмосферы $8 \div 14$ мкм, то это существенно расширяет возможности их применения, тем более, что в этом диапазоне нет других лазерных источников, сопоставимых с CO_2 – лазерами по мощности и КПД. Эти лазеры могут излучать в непрерывном, импульсном и частотно-импульсном режимах с КПД порядка 10%. Физические процессы при взаимодействии излучения с материалами в этих режимах заметно различаются.

Одним из ключевых узлов лазера, определяющим его рабочие характеристики, является оптический резонатор. В газовых лазерах резонатор обычно состоит из двух или более зеркал, одно из которых является выходным, и прозрачного окна разделяющего активную среду и атмосферу. Зачастую выходной элемент может совмещать функции окна и полупрозрачного зеркала. Недостаточно высокая лучевая (оптическая) стойкость материалов силовой оптики заметно ограничивает технические характеристики CO_2 – лазеров. Так, предельно достижимая интенсивность излучения реальной лазерной системы в настоящее время определяется, как правило, оптической стойкостью зеркал резонатора, в том числе, выходного элемента. Поэтому весьма актуальной является задача исследования физики процесса взаимодействия мощного лазерного луча с оптическими элементами.

Оптические приборы диапазона $8 \div 14$ мкм развиты заметно слабее, чем приборы видимого диапазона, что, не в последнюю очередь, вызвано дефицитом сравнительно недорогих, но высококачественных оптических материалов. В этой области прозрачны лишь некоторые, в основном, кристаллические материалы. Для изготовления отражающих зеркал, в обиходе называемых «глухими», обычно используют ряд

высокотеплопроводных металлов, прежде всего медь и её сплавы. Во многом, это вызвано тем, что многослойные интерференционные покрытия для области 10 мкм, как правило, заметно уступают по оптической и климатической стойкости металлическим зеркалам. Поэтому очень часто выходные параметры CO₂ – лазеров ограничиваются свойствами применяемых в них ИК – материалов.

Развитие CO₂ – лазеров, тепловизионных и ряда других оптических приборов диапазона 8 ÷ 14 мкм стимулировало углублённое исследование уже известных оптических материалов для этой области и поиски новых. Также активно развиваются технологии оптической обработки этих материалов и нанесения на них интерференционных покрытий.

Проблема обострилась ещё и тем, что, благодаря значительным достижениям в областях физики и техники газового разряда, а также созданию мощных источников питания, появились технологии эффективной накачки больших (десятки сантиметров) разрядных промежутков. Соответственно, для обеспечения работы таких лазеров потребовалась высококачественная широкоапертурная металло- и кристаллооптика. К моменту постановки данной работы полномасштабное создание такой оптики только разворачивалось.

Целью диссертационной работы являлось установление физических закономерностей, определяющих реальную оптическую стойкость материалов, используемых для изготовления силовой оптики, к воздействию излучения мощного импульсного CO₂ – лазера, в условиях, максимально приближённых к реальным условиям эксплуатации.

Для достижения этой цели были поставлены следующие основные задачи:

- исследование оптических свойств материалов, применяемых в CO₂ – лазерах;
- исследование реальной оптической стойкости основных монокристаллов, прозрачных в районе 10 мкм;
- исследование поведения медных зеркал при воздействии мощного лазерного импульса в лабораторных экспериментах и в условиях длительной эксплуатации в резонаторе мощного лазера;
- анализ физических явлений и закономерностей, приводящих к выходу из строя реальных оптических элементов;
- физическое обоснование путей улучшения качества материалов и их оптической обработки, а также реставрации оптических элементов;
- определение границ применимости в силовой оптике и электронике нового уникального конструкционного материала – поликристаллического алмаза;
- апробация полученных результатов в реальных условиях функционирования мощных лазерных систем.

Научная новизна

К началу работы в литературе практически отсутствовали систематизированные данные о многочисленных причинах выхода из строя металло- и кристаллооптики мощных крупноапертурных импульсных CO_2 – лазеров, эксплуатационных возможностях оптических элементов, а также о способах реставрации повреждённых деталей. Отсутствовали данные о некоторых оптических свойствах исследуемых материалов. Не существовало взаимосвязи между оптической стойкостью материала и его фундаментальными свойствами.

В результате проведенных исследований:

- получено прямое экспериментальное доказательство взаимосвязи оптической стойкости с фундаментальными свойствами материала, такими как ширина запрещённой зоны и энергия кристаллической решётки;
- установлены особенности прохождения импульсов мощных широких пучков ИК – излучения через оптические монокристаллы и их отражения от металлических зеркал и прозрачных материалов;
- определено влияние плазмы низкого порога оптического пробоя воздуха на процесс деградации лазерных зеркал и окон при импульсном воздействии излучения;
- выявлено влияние дефектов кристаллической структуры на оптическую стойкость материала;
- установлена причина возникновения и структура повреждений в этих материалах, их влияние на последующую работоспособность оптического элемента.

Теоретическая и практическая значимость

На основе разработанной методики исследования оптических характеристик сверхтонких (~ 100 мкм) образцов показано, что не только в монокристаллах LiF и CaF_2 , но и в поликристаллах MgF_2 (КО-1) экспериментально измеренное значение коэффициента поглощения $\beta(\nu)$ в диапазоне $8 \div 12$ мкм подчиняется теоретической зависимости – правилу Урбаха. Это позволяет с довольно высокой точностью рассчитывать величину β на коротковолновом краю фундаментальной полосы поглощения в области малой прозрачности путём экстраполяции уже известных зависимостей не только для монокристаллов, но и для широко применяемой в промышленности оптической керамики MgF_2 (КО -1).

Определены уровни предельно допустимых лучевых нагрузок на прозрачные оптические элементы мощных широкоапертурных импульсных CO_2 – лазеров.

Разработаны, изготовлены и испытаны выходные окна и зеркала мощных широкоапертурных импульсных CO_2 – лазеров из монокристаллического германия диаметром до 420 мм.

На основе исследования особенностей их повреждения излучением

выявлены дефекты оптической обработки зеркал, что позволило увеличить их долговечность после внесения корректив в процесс полировки. Предложена и запатентована технология химико-механической полировки германиевой оптики с улучшенными оптическими характеристиками.

Анализ механизмов повреждений оптических элементов из германия позволил обосновать и практически реализовать реставрацию оптической поверхности путем переполитровки изделий.

На основе исследования процесса порообразования в ЦГК в результате воздействия лазерного излучения предложен метод частичной реставрации повреждённых оптических элементов из ЦГК.

Высокая стойкость водоохлаждаемых алмазных окон и зеркал к воздействию непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера при мультимегаваттной плотности мощности позволяет рекомендовать материал для использования в элементной базе нового поколения изделий силовой оптики и электроники.

Предложена конструкция водоохлаждаемого алмазного лазерного окна с монокристаллической центральной зоной и поликристаллической периферийной частью, что позволяет снизить потери на поглощение и увеличить оптическую стойкость.

Оптимизируя параметры зеркал резонатора, удалось значительно улучшить параметры выходного излучения импульсного электроразрядного CO_2 – лазера. Получено КПД преобразования электрической энергии в энергию излучения до 22%. Полный КПД установки достигал 13%, а удельный съём энергии излучения – 51 Дж/л.

Объекты исследований

Большинство прозрачных в области 10 мкм монокристаллов, причём, как кристаллы, производимые промышленностью серийно, так и уникальные, специально выращенные монокристаллы, в том числе бездислокационные, а также изотопически чистые монокристаллы германия;

Резонаторные зеркала из меди и германия, проработавшие многие годы в реальных условиях эксплуатации мощного CO_2 – лазера при различной лучевой нагрузке, в том числе и близкой к предельной;

Образцы из поликристаллических алмазов, полученных методом химического осаждения из газовой фазы, полученные в СВЧ-плазмохимическом реакторе ARDIS-100.

Методы исследований

Отличием применённых в работе методов исследования оптической стойкости материалов является использование длиннофокусных линз и сравнительно широких пятен облучения, порядка 1 см². Это дало возможность, с одной стороны, путём масштабирования получать результаты, позволяющие использовать их практикующими создателями

мощных лазерных систем, а, с другой стороны - проводить исследование последствий воздействия современными приборами, применяемыми в физике твердого тела, с использованием статистических методов обработки результатов. Такой подход позволил выявлять влияние дефектов структуры материала и оптической обработки на исследуемые явления. Оптические свойства исследовавшихся в работе образцов, в том числе и сверхтонких, контролировались с помощью ИК – спектрометрии. Применялись методы оптической микроскопии, электронной микроскопии и рентгеноспектральные методы, а также метод оптической профилометрии.

Воздействие лазерного излучения на исследуемые материалы производилось:

- импульсным электроразрядным CO_2 – лазером с выходной энергией до 70 Дж [6];
- четырёхсекционным импульсным электроразрядным CO_2 – лазером с выходной энергией до 820 Дж [А10];
- 10-киловаттным непрерывным волоконным иттербиевым лазером ЛС – 10 (ИРЭ – ПОЛЮС).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Анализ воздействия мощных CO_2 – лазеров на оптические элементы, на основе рассмотрения механизмов:

- разрушения прозрачных оптических элементов импульсных CO_2 – лазеров, излучающих в режиме свободной генерации, которое вызывается плазмой низкого порога оптического пробоя воздуха, возникающего вблизи поверхности детали. Воздействие плазмы инициирует хрупкую и пластическую деформацию ионных кристаллов и приводит к возникновению в них радиационных дефектов;
- воздействия лазерного импульса на щёлочно-галогенидные кристаллы (ЩГК), приводящего к возникновению объёмных полостей вследствие оптического пробоя поглощающих микронеоднородностей, являющихся сложными примесными центрами, возникшими при коагуляции анионных примесей. Размеры пор в ЩГК определяются энергией кристаллической решётки;
- экспоненциальной зависимости нелинейных потерь излучения от ширины запрещённой зоны материала при прохождении излучения с плотностью мощности $10^7 \div 4 \times 10^8$ Вт/см² через прозрачные материалы, обусловленной поглощением излучения на генерируемых «горячих» неравновесных носителях заряда;
- аномального массопереноса в образцах сплава медь – хром в направлении перпендикулярном лазерному лучу. Эффект имеет место не только под зоной облучения, но и вне неё;

- лазерно-химической очистки металлических поверхностей;
- взаимодействия лазерного импульса с оксидированным дюралюминием;
- оптического пробоя в кристаллическом германии. Данный механизм имеет место только в приповерхностном слое материала, что предохраняет объем кристалла от разрушающего воздействия.

2. Применение в силовой оптике кристаллического германия ограничено величиной коэффициента поглощения, который определяется фононным поглощением ($\sim 0,02 \text{ см}^{-1}$) в области $2,5 \div 11 \text{ мкм}$ и зависит от концентрации свободных носителей. Зависимость коэффициента поглощения β от длины волны подчиняется экспериментально полученному выражению $\beta \sim \lambda^{1,2}$ и экспоненциально зависит от температуры.

3. В монокристаллах LiF , CaF_2 и в поликристаллах MgF_2 (КО-1) экспериментально измеренное значение коэффициента поглощения $\beta(\nu)$ в диапазоне $8 \div 12 \text{ мкм}$ подчиняется теоретической зависимости – правилу Урбаха.

4. Зависимость снижения частоты максимума полосы решёточного поглощения в германии с ростом массового числа изотопов германия. Сдвиг максимумов фононных полос поглощения от изотопа с массовым числом 74 к изотопу 70 соответствует 25 см^{-1} для первого пика (максимум для природного германия на частоте 841 см^{-1}), и в пределах 20 см^{-1} для второго и третьего пиков (максимумы для природного германия на частотах 749 и 645 см^{-1}).

5. Использование в лазерной оптике поликристаллических и монокристаллических алмазов имеет преимущество благодаря стойкости водоохлаждаемых алмазных окон и зеркал к воздействию непрерывным излучением ($\lambda = 1,07 \text{ мкм}$) мегаваттной плотности мощности, обусловленной высокой прозрачностью и высокой теплопроводностью алмаза. Разработанная конструкция водоохлаждаемого алмазного лазерного окна с монокристаллической центральной частью и поликристаллической периферийной частью позволит снизить потери на поглощение и увеличить оптическую стойкость.

Связь работы с научными программами, планами, темами

Работа выполнялась по программам НИОКР, проводимых НПО «Астрофизика» по техническим заданиям Министерства обороны СССР (1972 – 1991 г.г.); в рамках НИР «Разработка технологии получения силовой оптики из поликристаллического алмаза для мощных лазеров», шифр «Алмаз-Л», выполненной ФГУП «НПО «Астрофизика» по договору с Минпромторгом РФ (итоговый отчёт рег. № 122/1 - 104 от 27.05.2010 г.).

В работе использованы материалы, полученные при выполнении проектной части государственного задания по научной работе (проект

№ 4.1325.2014/К; проект № 11.1937.2014/К), в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (Соглашение 14.577.21.0004, RFMEFI57714X0004).

Степень достоверности полученных результатов и выдвигаемых на защиту научных положений определяется тем, что все экспериментальные данные получены с использованием современных методов физики. Данные, полученные в работе, вполне согласуются с экспериментальными результатами других авторов. Научные положения и выводы работы не противоречат основным положениям физики конденсированного состояния и лазерной техники.

Личный вклад соискателя в диссертационную работу заключается в определении цели и постановке задачи, выборе способов решения и методов исследования, проведении методических и физико-технологических разработок, постановке и проведении экспериментов, а также обработке, анализе и интерпретации полученных результатов, написании научных статей и докладов. Автором внесен определяющий вклад в разработку физических основ описываемых процессов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всесоюзных, российских и международных конференциях, совещаниях и семинарах:

I Всес. шк.-конф. «Применение лазеров в машиностроении и других областях техники и физические вопросы разработки газовых лазеров», (Москва, 1974 г.); VII Всес. сов. по получению профилированных кристаллов способом Степанова и их применению в народном хозяйстве, (Ленинград, 1976 г.); IV Всес. сов. по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом, (Ленинград, 1978 г.); VIII Всес. сов. по получению профилированных кристаллов способом Степанова и их применению в народном хозяйстве, (Ленинград, 1979 г.); V Всес. сов. по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом, (Ленинград, 1981 г.); X Сибирском сов. по спектроскопии «Инверсная заселённость и генерация на переходах в атомах и молекулах», (Томск, 1981 г.); IX Сов. по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применению в народном хозяйстве, (Ленинград, 1982 г.); VI Всес. конф. по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом, (Вильнюс, 1984 г.); VI Всес. конф. «Оптика лазеров», (Ленинград, 1990 г.); VII Межд. форуме «Высокие технологии XXI века», (Москва, 2006 г.); III Межд. конф. по физике кристаллов «Кристаллофизика 21 – го века», (Москва, 2006 г.); конф. V Межд. форума «Лазерные и оптические системы и технологии», (Москва, 2009 г.); XIV Нац. конф. по росту кристаллов, IV Межд. конф. «Кристаллофизика XXI

века», посв. памяти М.П. Шаскольской, (Москва, 2010 г.); XVII Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», (Краснодар, 2011 г.); II Моск. чтения по проблемам прочности материалов, (Москва, Черноголовка, 2011 г.); XVIII Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», (Краснодар, 2012 г.); VII Межд. конф. ФППК-2012 «Фазовые превращения и прочность кристаллов», (Москва, Черноголовка, 2012 г.); Научно-практ. конф. «Современные тенденции и принципы построения авиационных оптико-электронных систем», (Екатеринбург, 2012 г.); XII Межд. науч. конф.-шк. «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение», (Саранск, 2013 г.); IX Межд. форуме OPTICS-EXPO «Оптические системы и технологии», (Москва, 2013 г.); XIX Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», (Краснодар, 2013 г.); Межд. симп. «Физика кристаллов 2013», (Москва, 2013 г.); VII Отраслевой научно-техн. конф. «Проблемы создания лазерных систем», (Россия, Владимирская область, Радужный, 2013 г.); XX Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», (Краснодар, 2014 г.); XI Межд. конф. «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», (Курск, 2014 г.); VIII Межд. конф. ФППК-2014 «Фазовые превращения и прочность кристаллов», (Черноголовка, 2014 г.); VI Межд. конгр. «Цветные металлы и минералы», (Красноярск, 2014 г.); V Межд. конф. ФизтехБио (г. Долгопрудный, 2015 г.); VI Межд. конф. «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов», посв. 90 - летию со дня рождения проф. Ю.А. Скакова, (Москва, 2015 г.); XXI Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред», (Краснодар, 2015 г.); XIV Научно-техн. семинаре «Актуальные вопросы создания оружия направленной энергии и исследования стойкости ракетно-космической техники к воздействию его поражающих факторов», (Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха, 2015 г.).

Публикации

Материал диссертации изложен в 51 публикации, включая 2 монографии (в соавторстве), из них в журналах из списка ВАК - 22, а также в 1 авторском свидетельстве СССР, 3 патентах РФ и 3 заявках на патент РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения, списка сокращений и обозначений, а также списка литературы. В конце каждой главы приводятся выводы. Работа содержит 142 рисунка и 24 таблицы, встроенные в текст. Список литературы включает 422 наименования. Общий объем диссертации составляет 351 страницу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность данной диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, представлены научная новизна, научная значимость и практическая ценность полученных результатов.

В главе 1 кратко рассмотрены общие сведения о современных мощных импульсных CO_2 -лазерах и особенностях их конструкции, условия работы выходных зеркал и окон, а также основные факторы, влияющие на работоспособность таких лазеров. Рассмотрены основные физико-химические свойства прозрачных и высоко отражающих материалов для области спектра 10 мкм, в частности, свойства моно- и поликристаллических алмазов, а также оптические свойства материалов металлооптики. Проанализированы перспективы применения этих материалов в CO_2 -лазерах. Сформулированы общие требования и критерии для выбора оптических материалов мощных лазеров.

Выходную энергию CO_2 -лазеров обычно увеличивают за счёт роста апертуры, так как сравнительно низкая оптическая стойкость зеркал и окон не позволяет добиться требуемого выхода за счёт увеличения длины активной среды. Увеличение разрядного промежутка приводит к резкому росту напряжения в цепях питания. Апертуры таких лазерных систем достигают $700 \times 700 \text{ мм}^2$ при энергии на выходе в десятки кДж [3, 4].

Поэтому, с учётом совокупности физико-химических свойств, были выбраны материалы для проведения натурных экспериментов по исследованию эксплуатационных характеристик зеркал резонатора импульсного CO_2 -лазера. Это: германий и хлорид натрия, применяемые для изготовления полупрозрачных выходных зеркал, а также медь и сплавы на её основе для производства «глухих» зеркал.

Из этих материалов германий имеет самую большую твёрдость, что позволяет формировать из него высокоточные оптические детали, практичные в эксплуатации, поскольку они не взаимодействуют с атмосферной влагой, не токсичны, прочны, имеют хорошие теплофизические свойства. Германий широко применяется в ИК-технике, имеются технологии выращивания кристаллов Ge диаметром до 600 мм [7]. Недостатком его является наличие резкой температурной зависимости коэффициента поглощения.

Щёлочно-галогенидные кристаллы NaCl и KCl имеют лучшие оптические свойства в области 10 мкм, однако они обладают крупными недостатками – хорошо растворимы в воде и хрупки.

Медь обладает хорошими оптическими и теплофизическими свойствами, но её недостатками являются невысокие механические свойства, а также низкая коррозионная устойчивость, что вызывает

необходимость улучшить эти свойства путём легирования металла упрочняющими добавками или нанесением на рабочую поверхность тонкоплёночных покрытий.

Рассмотрены главные механизмы разрушения прозрачных материалов излучением импульсных и непрерывных лазеров в области 10 мкм и методы исследования этих явлений. Изложены основные методики исследования оптической стойкости прозрачных кристаллов. Показано, что эти методики позволяют получать данные, характерные скорее для идеального кристалла, чем для реального, то есть оптическая стойкость определяется порогом лавинного пробоя в электрическом поле световой волны. Рассмотрено влияние поглощающих микровключений на процесс пробоя.

Проанализированы физические явления, определяющие величину коэффициента поглощения (β) в прозрачных материалах и пути получения кристаллов с минимальными значениями β .

Проанализированы оптико-физические свойства и перспективы применения алмазов в CO_2 – лазерах и других изделиях силовой оптики и электроники. Показано, что поликристаллические алмазы (ПА), получаемые химическим осаждением из газовой фазы, являются крайне перспективным материалом для CO_2 – лазеров.

Рассмотрены и проанализированы оптические свойства перспективных материалов для металлических зеркал CO_2 – лазеров.

В настоящей главе показано, что:

- предельное значение мощности излучения, которое выдерживают резонаторные зеркала, ниже оптической стойкости активной среды CO_2 – лазеров;

- требования к оптическим характеристикам являются максимальными практически по всем свойствам материалов, что не всегда достижимо и вынуждает идти на компромиссы и оптимизировать подбор материала в зависимости от конкретного применения в лазере;

- оптимизация оптической схемы конкретного мощного лазерного комплекса требует глубоких знаний свойств используемых материалов, возможностей улучшения технологии их получения и обработки, а также их реакций на лучевые воздействия. В нужном объёме эти сведения на момент начала данной работы отсутствовали.

Сформулировано, что на момент постановки настоящих исследований оставался ряд вопросов, данные по которым противоречивы, либо отсутствуют, или недостаточно освещены в литературе:

- были недостаточно изучены механизмы повреждения реальных оптических элементов излучением в присутствии плазмы низкого порога оптического пробоя воздуха;

- недостаточно данных о характере прохождения излучения через

прозрачную оптику и механизма отражения металлических зеркал в присутствии низкопорогового оптического пробоя воздуха вблизи поверхности;

- недостаточно исследовано влияние поверхностных и объёмных дефектов структуры реального кристалла на его оптическую стойкость;

- недостаточно изучен процесс оптической усталости реальных лазерных зеркал и окон, то есть накопление повреждений при многократном воздействии излучением, плотность мощности которого несколько ниже пороговой;

- не были изучены особенности поведения силовой алмазной оптики;

- не был изучен механизм лазерно-химической очистки металлооптики;

- не были исследованы возможности восстановления оптических элементов мощных лазеров после длительной эксплуатации.

В главе 2 изложены методики и результаты спектрофотометрических исследований использовавшихся в работе оптических материалов. Несмотря на то, что оптические свойства большинства материалов, исследовавшихся в настоящей работе, в основном, хорошо изучены, нами получены некоторые новые результаты, изложенные в данной главе.

Измерения спектров пропускания образцов проводились на двухлучевых ИК – спектрофотометрах «Perkin – Elmer – 580», «Hitachi – 225».

Исследовано фундаментальное поглощение в сверхтонких образцах (толщиной ~ 100 мкм) фторидов кальция, магния, лития в области $8 \div 12$ мкм. Измерены зависимости коэффициентов поглощения от длины волны (λ). Получены значения β для $\lambda = 10,6$ мкм. Подтверждено, что экспериментально измеренное значение $\beta(\lambda)$ в диапазоне $8 \div 12$ мкм подчиняется теоретической зависимости – правилу Урбаха. Это позволяет с довольно высокой точностью рассчитывать величину β на коротковолновом краю фундаментальной полосы поглощения путём экстраполяции уже известных зависимостей $\beta(\lambda)$ не только для монокристаллов, но и для широко применяемой в промышленности оптической керамики MgF_2 (КО-1).

Сообщается о результатах исследования поглощения ИК – излучения в монокристаллах германия n-типа, использовавшихся в данной работе, в зависимости от величины удельного сопротивления, температуры и длины волны в области $2,5 \div 11$ мкм. Цель данного исследования состояла в установлении взаимосвязи между электрофизическими и оптическими параметрами монокристаллического германия с минимальным значением β . Установлено, что зависимость коэффициента поглощения от длины волны подчиняется выражению $\beta \sim \lambda^{1,2}$. Величина β экспоненциально зависит от

температуры. Минимальное значение β наблюдалось в образцах n – типа с удельным сопротивлением $\rho \sim 5 \text{ Ом} \times \text{см}$. Таким образом, путём оптимизации концентрации электроактивных примесей удаётся снизить величину коэффициента поглощения практически до фононного предела.

Так как известно, что в области $12 \div 14 \text{ мкм}$ имеются полосы поглощения германия, обусловленные взаимодействием света с фононами [А28], встала задача изучения влияния изотопического состава Ge на положение этих полос. Эксперименты были проведены на образцах изотопически чистых монокристаллов германия ^{70}Ge и ^{74}Ge . В качестве образцов сравнения использовались оптически обработанные пластины из монокристаллов германия природного изотопического состава, выращенных на Запорожском титано-магниеком комбинате и в Тверском государственном университете из заведомо разных партий исходного сырья и полученных различными методами – Чохральского и Степанова. Обнаружено, что решёточные пики поглощения на частотах $\nu - 850, 755, 650 \text{ см}^{-1}$, наблюдаемые в монокристаллах германия природного изотопического состава, в моноизотопных кристаллах сдвигаются. Причём в монокристаллах ^{70}Ge наблюдается рост частоты полосы поглощения (ν), а в ^{74}Ge ν уменьшается по сравнению с монокристаллами природного изотопического состава.

Получена зависимость частот пиков решёточного поглощения ν в монокристаллах германия от массового числа M

$$\nu = 1,6 \nu_0 \times e^{-kM}, \quad (1)$$

где: ν_0 – частота максимума соответствующей полосы фононного поглощения при $M = 70$; k – степенной коэффициент, находящийся в диапазоне $0,0062 \div 0,0072$.

Исследованы оптические свойства кристаллов лейкосапфира в области $10,6 \text{ мкм}$. Величина $\beta_{10,6} = (2 \div 3) \times 10^4 \text{ см}^{-1}$ получена путём аппроксимации известных данных по значениям коэффициента поглощения в видимой и ИК – областях спектра (до 7 мкм) в диапазоне температур $300 \div 2300 \text{ К}$. Измеренный коэффициент отражения составил $\sim 6\%$.

В главе 3 изложены результаты исследования порогов плазмообразования вблизи оптической поверхности и влияния плазмы воздуха на прохождение лазерного импульса через прозрачный оптический элемент, а также морфологии возникающих в них повреждений. Воздействие импульса CO_2 – лазера на материалы производилось в условиях, максимально приближенных к реальным, при размерах пятна до $\sim 1 \text{ см}^2$. Для этого излучение лазера собиралось на образцы длиннофокусной линзой, то есть, на мишень воздействовал почти параллельный лазерный луч, что позволило усреднить влияние отдельных микродефектов кристалла на его оптическую стойкость в целом, и в то же время исследовать морфологию возникающих в них повреждений

методами физики конденсированного состояния.

За энергетический порог оптической стойкости реальных оптических элементов принималась средняя плотность энергии лазерного импульса на образце, при которой возникали заметные обратимые или необратимые изменения оптических характеристик детали, либо повреждения, препятствовавшие её дальнейшей эксплуатации.

При плотности энергии воздействующего импульса $W_{E1} \sim 10$ Дж/см² перед поверхностями большинства образцов возникал низкопороговый оптический пробой воздуха. Образование плазмы возможно как вблизи входной, так и выходной граней образца, или обеих одновременно. В материалах с низким показателем преломления (n) плазма несколько чаще возникала на выходной грани. Последовательный рост плотности энергии приводил к образованию пробоя только вблизи входной грани, в воздухе. Пробой происходил без соприкосновения с поверхностью образцов. Увеличение n влечёт за собой рост вероятности плазмообразования вблизи входной грани. Так, при воздействии на Ge ($n = 4,0$) и GaAs ($n = 3,28$) плазма наблюдалась лишь перед входной поверхностью. Время жизни плазменного факела $\tau_{\phi} \sim 20 \div 25$ мкс значительно превышает длительность лазерного импульса $\tau_{имп} \sim 5$ мкс (по основанию).

Разница между порогами пробоя перед мишенями из различных материалов практически не превышала величину разброса порогов для образцов из одного материала. Порог пробоя перед поверхностью прозрачного образца на порядок ниже порога оптического пробоя воздуха при том же сечении лазерного луча и весьма близок к порогу возникновения низкопорогового оптического пробоя воздуха перед непрозрачной преградой. В главе 6 показано, что аналогичный эффект наблюдался и при воздействии излучения на металлические зеркала.

Плазма пробоя с момента времени отсечки ($\tau_{отс}$) практически полностью поглощала лазерное излучение. В нашей работе временем отсечки называется время прозрачности оптического элемента, то есть временной промежуток от начала генерации до момента, когда максимальная интенсивность прошедшего через кристалл излучения снижалась в e раз. Поэтому величина порога пробоя, даже в отсутствие заметных следов повреждения образца, принималась нами за величину реального порога оптической стойкости. Воздействие излучением допороговой интенсивности не генерировало существенных повреждений в кристаллах, препятствовавших их дальнейшей эксплуатации.

В диапазоне $W_{P1} = 10^7 \div 4 \times 10^8$ Вт/см² при размерах луча на кристалле 3×4 мм² исследована динамика прохождения лазерного импульса. Импульсы генерации и излучения, прошедшего через образец, регистрировались фотоприёмниками на эффекте фотонного увлечения дырок в германии (ФП). В процессе работы разработан и изготовлен из

монокристалла Ge *p*-типа оригинальный фотоприёмник с перестраиваемыми чувствительностью и временным разрешением.

Оптический пробой воздуха лабораторного помещения измерялся с целью калибровки. С вероятностью 0,5 он происходил при $W_{P1} \sim 200$ МВт/см², что соответствует данным монографии [8]. При пробое пиковая часть импульса проходила через воздушную плазму без заметных искажений. Амплитуда сигнала практически не уменьшалась, а $\tau_{отс}$ флуктуировало случайным образом от импульса к импульсу.

Введение прозрачного образца в луч заметно изменяет картину пробоя - порог резко снижается. При $W_{P1} = 20 \div 50$ МВт/см² вблизи поверхности кристалла возникает оптический пробой воздуха и наблюдается эффект отсечки. Время отсечки уменьшается с ростом W_{P1} и практически не зависит от свойств материала. Зарегистрированные значения $\tau_{отс}$ находятся в диапазоне 0,2 ÷ 1,2 мкс и хорошо воспроизводятся от импульса к импульсу в пределах точности измерений. Время отсечки не зависит от материала образца и определяется интенсивностью воздействующего излучения. Следовательно, поглощение периферийной части лазерного импульса происходит, главным образом, в плазме пробоя воздуха. Аналогичные эффекты наблюдались и при исследовании отражения от медных зеркал (глава 6).

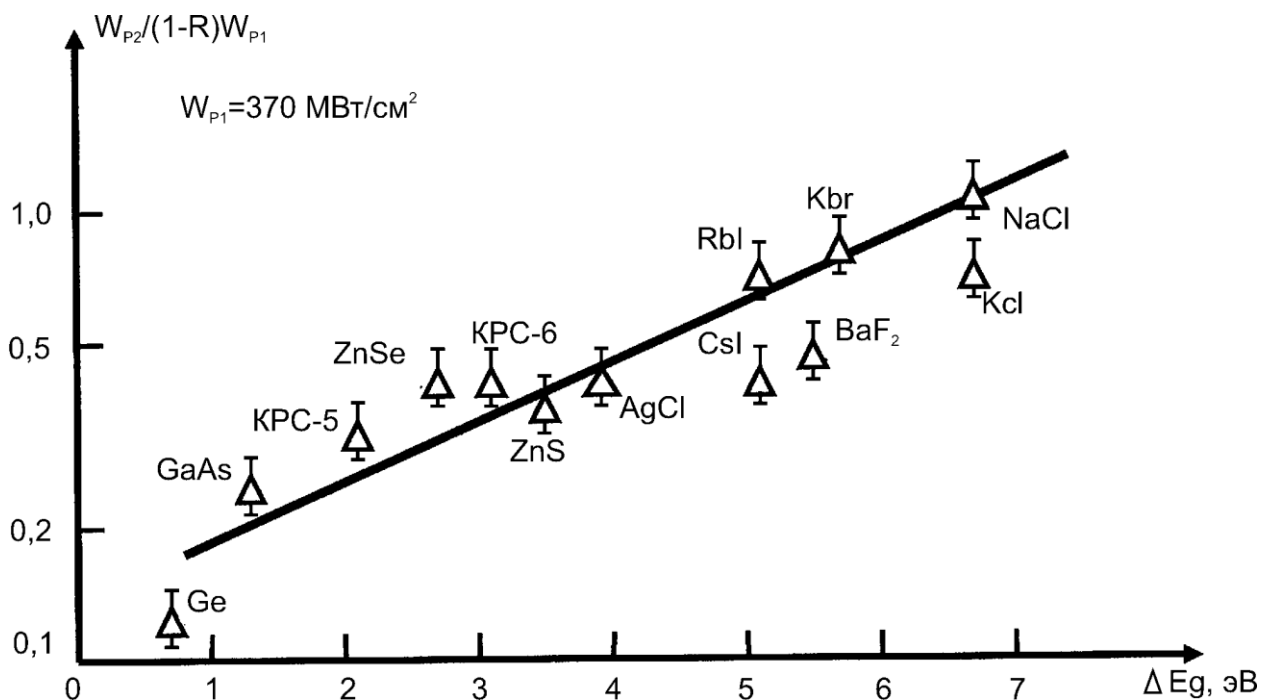


Рисунок 1 - Экспериментально измеренная зависимость отношения амплитуд прошедшего импульса к воздействию ($W_{P2}/(1-R)W_{P1}$) от ширины запрещенной зоны материала

Экспериментально определены нелинейные потери при прохождении пиковой части лазерного импульса (в диапазоне $W_{P1} = 10^7 \div 4 \times 10^8$ Вт/см²) через материалы, прозрачные в области 10 мкм (рисунок 1). Выявлены причины возникновения потерь, возрастающих с увеличением W_{P1} . Воздействие переднего фронта импульса генерирует появление в кристалле горячих неравновесных носителей заряда, поглощающих излучение. Нелинейные потери излучения на них экспоненциально растут с уменьшением ширины запрещённой зоны кристалла. Зависимость, показанная на рисунке 1, аппроксимируется выражением

$$W_{P2} \approx 0,365(1-R) \times W_{P1} \times \exp(0,23 \Delta E_g). \quad (2)$$

Коэффициент $0,365 \sim 1/e$, а коэффициент $0,23$ имеет размерность $1/2kT$, где T – некая характеристическая температура. Тогда уравнение (2) можно представить в виде

$$W_{P2} = \frac{(1-R) \times W_{P1}}{\exp(1 - \frac{\Delta E_g}{2kT})}, \quad (3)$$

где параметр $T \sim 2,5 \times 10^4$ К.

Продемонстрирована принципиальная возможность увеличения пиковой мощности проходящего через оптический элемент излучения за счёт профилирования заднего фронта импульса.

Установлено, что плазменный факел является источником разного рода вторичных воздействий на оптический элемент. Разлёт плазмы при температуре $\sim 10^4$ К происходит с достаточно высокой скоростью и приводит к появлению заметных повреждений поверхности.

Повреждение ЦГК заключалось, прежде всего, в растрескивании приповерхностного слоя грани, вблизи которой наблюдалась плазма. Глубина трещин достигала ~ 1 мм, а иногда и более. В приповерхностном слое возникали короткоживущие центры окраски, отжигавшиеся при комнатной температуре за $2 \div 3$ мин. Поверхность пластичных ионных кристаллов, соприкасавшаяся с плазмой, приобретала достаточно устойчивую окраску и изменяла свою форму вследствие пластической деформации. Это заметно снижало пропускание кристалла в области 10 мкм. Кристаллы Ge и GaAs плазмой факела практически не поражались.

Повреждения собственно лазерным излучением в этом случае незначительны и не приводят к немедленному выходу из строя оптического элемента, но ухудшают его оптическое качество и имеют склонность к накоплению. В объёме большинства кристаллов после воздействия излучением с $W_E \sim 2 \div 5$ Дж/см² возникали рассеивающие центры размером до $30 \div 100$ мкм, окружённые полями внутренних напряжений, хорошо видными в поляризованном свете. Эти повреждения вызваны наличием в материалах поглощающих микронеоднородностей, исходные размеры которых не позволяют выявить их с помощью оптической микроскопии.

Наличие подобных структурных дефектов в приповерхностном слое оптических элементов зачастую приводит к образованию микрократеров на поверхности. Подробнее эти эффекты рассмотрены в главе 5.

При многократном воздействии сверхпороговым излучением образцы исследованных ЦГК выдерживали не более $6 \div 8$ импульсов, после чего они катастрофически разрушались. Интенсивность прошедшего через них при этом излучения снижалась на $1,5 \div 2$ порядка. Пластичные ионные кристаллы, хотя и не разрушались катастрофически, но возникшие в них повреждения также накапливались и препятствовали прохождению излучения. Наиболее стабильны в этом случае монокристаллы германия. Интенсивность прошедшего через них сигнала снижается только вдвое после $5 \div 10$ импульсов, а повреждения локализуются исключительно в приповерхностном слое.

Экспериментальные исследования, описанные в настоящем разделе, обусловлены, прежде всего, практическим применением лазеров, а именно, необходимостью определения предельных значений плотностей энергии и мощности, которые могут быть выведены через прозрачный элемент. Эти данные имеют практическую значимость, так как некоторые материалы не претерпевают катастрофического разрушения при сверхпороговом воздействии.

Результаты, полученные в настоящей главе, сопоставлены с физико-химическими свойствами использованных материалов. Сделан вывод, что значительный интерес для оптики импульсных CO_2 – лазеров представляют: германий, как материал, способный без катастрофического разрушения выдерживать значительные лучевые перегрузки, и хлористый натрий, как материал, обладающий лучшими оптическими свойствами на длине волны генерации.

В главе 4 изложены экспериментальные результаты исследования морфологии повреждений в монокристаллах Ge после воздействия излучения мощного импульсного CO_2 – лазера. Исследования проводились как на серийно выпускаемых промышленностью монокристаллах марки ГМО (германий монокристаллический оптический), обработанных по технологии, применяемой в оптической промышленности, так и на специально выращенных образцах бездислокационных кристаллов, поверхность которых полировалась химически по технологии, используемой в полупроводниковой промышленности. При анализе этих двух технологий обработки была создана новая технология химико-механического полирования (ХМП) германия, позволяющая создавать высокоточные оптические детали из монокристаллического Ge. Поверхность таких деталей обладала минимальной величиной нарушенного слоя.

Методами световой и электронной микроскопии и рентгеновской

томографии исследованы морфология повреждений оптических элементов из Ge мощным импульсом CO_2 – лазера. Показано, что в диапазоне амплитудных значений плотности мощности излучения $2 \times 10^6 \div 4 \times 10^8$ Вт/см² реализуются два основных типа повреждений.

При $W_{\text{PI}} < 4 \times 10^7$ Вт/см² наблюдаются очаги локальных микроразрушений приповерхностного слоя. Локальные микроразрушения, возникающие при $W_{\text{PI}} < 4 \times 10^7$ Вт/см² вследствие пробоя либо на поглощающих микронеоднородностях типа кластеров, находящихся в приповерхностном слое, либо на дефектах оптической обработки, являются результатом микровзрывов, образующих кратеры, окружённые характерной плёнкой продуктов выброса. На поверхности вокруг кратеров часто наблюдается волновая картина, являющаяся, видимо, результатом последствия поверхностных ударных волн, возникающих при взрыве, с давлением на фронте выше предела упругости материала.

Воздействие лазерного излучения с плотностью мощности более 4×10^7 Вт/см² приводит к оплавлению слоя глубиной $1 \div 3$ мкм, что объясняется генерацией лавинного пробоя в приповерхностном слое германия. Поглощение на неравновесных носителях заряда приводило к выделению большей части энергии лазерного импульса в этом слое, что предохраняло объём оптического элемента от поражения излучением сверхпороговой интенсивности. Выявление этого эффекта дало возможность установить, что оптические детали из германия повреждались излучением лишь частично, в приповерхностном слое. Этот факт позволил полностью восстанавливать их путём переполитровки.

В главе 5 изложены экспериментальные результаты исследования морфологии объёмных и поверхностных повреждений, возникающих в щёлочно-галогидных монокристаллах NaCl, KCl, KBr и RbI в результате воздействия излучением мощного импульсного CO_2 – лазера. Проведены исследования как на серийно выпускаемых монокристаллах, так и на специально выращенных образцах с контролируемым уровнем примесей. Эксперименты проводились как на оптически полированных образцах, так и на образцах, выкалываемых непосредственно перед воздействием по плоскостям спайности $\{100\}$. Эти поверхности соприкасались с лабораторным воздухом не более 1 мин, что во многом снижало влияние атмосферной влаги на полученные результаты.

Обнаружено, что в ЩГК, выращенных в атмосфере воздуха, в результате воздействия импульса CO_2 – лазера с плотностью мощности $10^6 \div 10^7$ Вт/см² возникали микрополости размером до $30 \div 100$ мкм. Объёмная плотность этих полостей достигала $\sim 10^5$ см⁻³.

Исследована статистика распределения полостей по размерам в зависимости от условий воздействия. Установлено, что полости возникали вследствие оптического пробоя на поглощающих микронеоднородностях,

появившихся, видимо, при коагуляции посторонних примесей, преимущественно анионных, причём природа этих примесных центров сходна в NaCl, KCl, KBr и RbI.

Обнаружена фотоионизация примесных центров коротковолновой составляющей излучения плазменного факела, заметно снижавшая порог пробоя на этих микронеоднородностях.

Размеры и концентрация полостей, возникших при воздействии излучением длительностью до 1 мкс, прошедшем через плазму оптического пробоя воздуха перед входной поверхностью образца, идентичны в NaCl, KCl, KBr и RbI. В среднем они составляли ~ 20 мкм и $\sim 3 \times 10^4$ см⁻³, соответственно.

Размеры полостей в ЦГК, возникших в результате воздействия излучением длительностью до 5 мкс, определялись свойствами материала и подчинялись экспериментально найденной зависимости среднего значения массы материала m_{cp} , вынесенного из полости (в сферическом приближении), от энергии кристаллической решётки – ξ (рисунок 2):

$$m_{cp} \approx 0,07 \cdot \exp(-0,09 \cdot \xi). \quad (4)$$

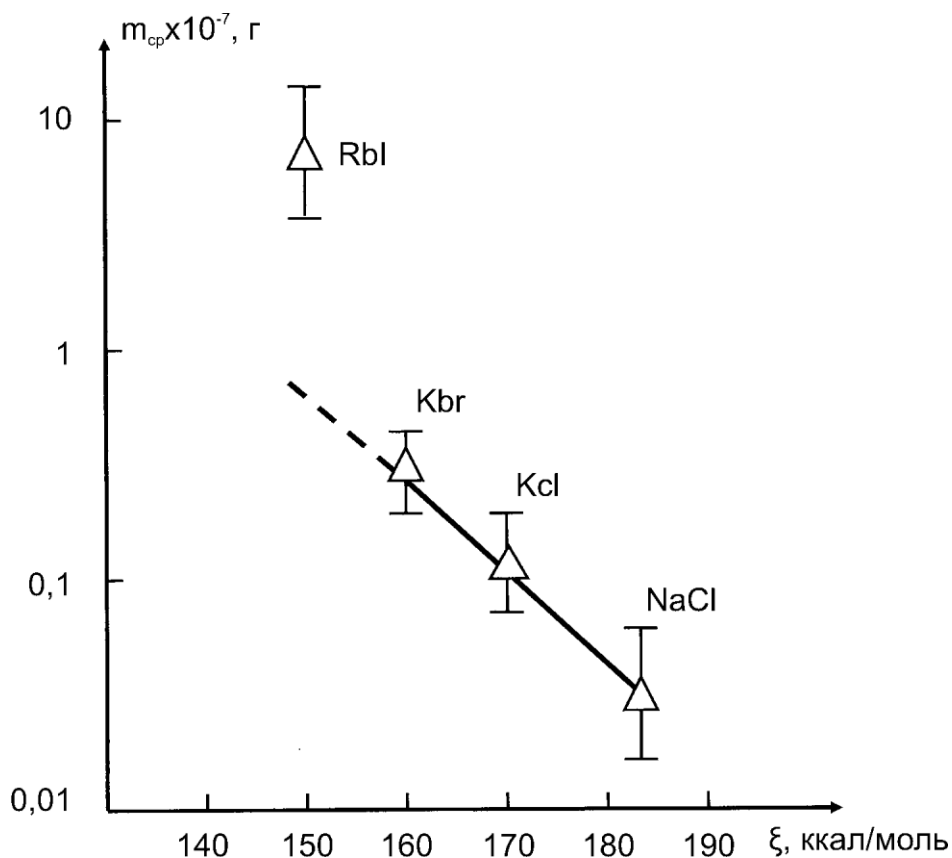


Рисунок 2 - Зависимость массы материала, вынесенного из полости, от энергии решетки кристалла

Для такого воздействия характерно наличие максимального размера полостей, увеличить который путём роста плотности энергии излучения,

выделившегося на дефекте, не удаётся, вследствие развития из полости магистральных макротрещин и последующего катастрофического разрушения всего образца. В уравнении (4) коэффициент $\alpha = 0,09$ можно представить в виде $1/RT$, где $T \sim 5500$ К - некоторая характеристическая температура, имеющая физический смысл средней температуры плазмы внутри полости $T_{\text{п}}$.

Анализ экспериментальных данных позволяет считать, что в момент образования полостей в них возникал оптический пробой на микронеоднородностях кристалла, приводящий к появлению в объёме образца плазменных образований со средней температурой $T_{\text{п}} \sim 5500$ К и давлением порядка 10^4 кГ/см². Так как формирование микрополостей происходило в объёме кристалла, то возникли условия разрушения материала, близкие к условиям разрушения идеального кристалла. Механическая прочность идеальных ЦГК $\sim 10^4$ кГ/см². Образование полости происходит, в основном, во время действия импульса излучения за счёт двух основных процессов – испарения на фронте волны поглощения (скорость волн поглощения ~ 5 м/с) и пластической деформации. Эти данные численно согласуются с известными теоретическими расчётами.

Исследование поражённых образцов в поляризованном свете показало, что микрополости являются центрами значительных внутренних напряжений, выявляемых по розеткам двойного лучепреломления, имеющих размер до ~ 1 мм.

Исследована кинетика отжига лазерных микрополостей при предплавильной температуре (на образцах из кристаллов КСl). Показано, что полости залечивались термическим отжигом при атмосферном давлении внешней среды благодаря релаксации полей внутренних напряжений, локализованных вокруг них. На основе этого явления предложен метод частичной реставрации элементов лазерной оптики из ЦГК.

Впервые изучено влияние ионизирующей радиации на процесс объёмного порообразования в NaCl при поражении импульсом излучения CO₂ – лазера. Показано, что ни F -, ни M - центры сами по себе не способствовали возникновению полостей. Однако, эти центры склонны к термически активируемой коагуляции с последующим образованием коллоидальных частиц металла, которые резко снижают порог оптического пробоя и инициируют процесс порообразования. Полученные данные необходимо учитывать при разработке лазеров, использующих для накачки ионизирующее излучение, например, электроионизационных лазеров.

В кристаллах NaCl и КСl, специально очищенных от посторонних примесей путём выращивания в атмосфере фосгена (содержание как анионных, так и катионных примесей не превышало 10^{-6} вес. %), следы объёмного пробоя отсутствовали и при заметном превышении порога

образования плазменного факела перед поверхностью образца (при плотности энергии до $\sim 50 \text{ Дж/см}^2$).

На основе полученных в данной главе результатов предложен и апробирован новый способ определения оптической однородности в прозрачных материалах, основанный на локальном нагреве импульсным лазерным излучением микро- и наноразмерных поглощающих микронеоднородностей путем выявления нагретых дефектов с помощью тепловизионного прибора.

В главе 6 представлены результаты исследования оптической стойкости медных зеркал для мощных импульсных CO_2 – лазеров.

При изучении поведения медных зеркал мощного импульсного электроразрядного CO_2 – лазера, вблизи поверхности которых при плотности энергии $5 \div 10 \text{ Дж/см}^2$ происходит низкопороговый оптический пробой воздуха, обнаружено, что пик импульса проходил через плазму почти без потерь. Через $\sim 0,5 \div 1 \text{ мкс}$ после начала генерации прохождение излучения практически прекращалось – наблюдался эффект отсечки излучения. На поверхности зеркал заметные повреждения не наблюдались. В отличие от случая прохождения импульса излучения CO_2 – лазера через прозрачные материалы, изложенного в главе 3, при отражении от зеркала лазерный луч проходит через плазменное образование дважды, поэтому эффект отсечки проявляется ярче.

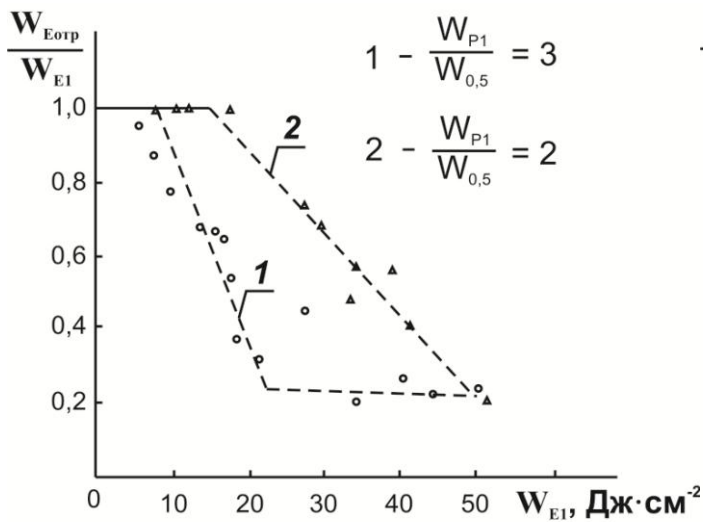


Рисунок 3 - Зависимость отношения $W_{\text{Еотр}}/W_{\text{Е1}}$ от плотности энергии воздействующего ЛИ для двух вариантов - $W_{\text{P1}}/W_{\text{P0,5}} = 2$ и 3

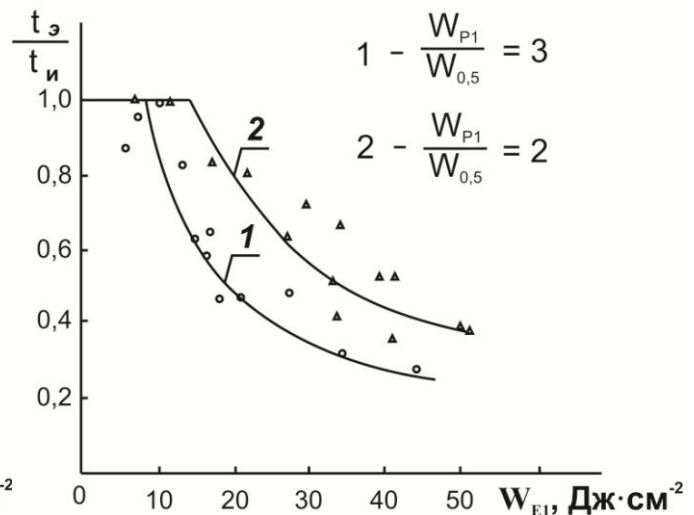


Рисунок 4 - Зависимость отношения $t_{\text{э}}/t_{\text{и}}$ от плотности энергии ЛИ. W_{P1} – плотность энергии в пике импульса, а $W_{\text{0,5}}$ – течение первых 0,5 мкс импульса

Приводятся результаты экспериментального исследования изменения доли отраженного от поверхности лазерного излучения в зависимости от средней плотности энергии и формы импульса. Получена зависимость времени отсечки от энергии и формы воздействующего и отражённого

импульсов (рисунки 3, 4). Энергетический порог развития непрозрачности плазмы $W_{Ез}$ определяет минимальную плотность энергии в лазерном импульсе (ЛИ), при превышении которой проявляется эффект непрозрачности. Время t_3 - время нарастания оптической плотности плазмы до некоторой величины $N_{крит}$, при которой она становится непрозрачной.

Методом дифракционной электронной микроскопии исследована структура образцов сплава медь - хром размером $50 \times 10 \times 0,1$ мм³ на глубине 50 мкм от поверхности после облучения импульсом 10^7 Вт/см². И под пятном облучения (1 см²), и на заметном удалении от него зафиксирована миграция большеугловых границ зерен, формирование блочной структуры, а также «растворение» частиц хрома в матрице, возможное лишь при аномальном увеличении коэффициента диффузии (на несколько порядков). То есть обнаружен эффект аномального массопереноса в направлении перпендикулярном лазерному лучу, причем не только под зоной облучения, но и вне неё. Результат объяснён передачей энергии лазерного импульса в упругую волну.

При воздействии лазерного излучения на поверхность металла наблюдались светящиеся пятна, выделяющиеся своей яркостью на общем фоне облучённой зоны. Предполагается, что яркие локальные участки в пятне облучения возникали на поверхностных образованиях, существенно отличающихся своими оптическими и теплофизическими свойствами от чистой поверхности металла. Это могут быть, например, участки поверхности металла, покрытые тонкой диэлектрической поглощающей пленкой. Кроме того, в процессе шлифовки и полировки приповерхностный слой зеркала шаржируется частицами абразива, также поглощающими лазерное излучение. На таких образованиях заметно увеличивается поглощение света, а их нагрев значительно превышает соответствующую величину поглощения самого металла. Естественно, что наличие подобных образований на зеркале не только снижает интегральный коэффициент отражения по сравнению с чистой поверхностью, но и повышает вероятность оптического пробоя.

Далее сообщается об экспериментальных исследованиях длительной эксплуатации реальных медных зеркал импульсного CO₂ – лазера в условиях максимально возможной лучевой нагрузки – в резонаторе лазера. Перед установкой в лазерную кювету измерялся коэффициент зеркального отражения (КЗО) зеркала. После цикла эксплуатации ($\sim 10^3$ пусков) зеркало снимали и определяли КЗО, снизившийся в процессе эксплуатации.

Длительная эксплуатация в среде газового разряда приводила к образованию на поверхности зеркала темной пленки. Она состояла в основном из продуктов разложения легкоионизируемой присадки (три - n - пропил-амин) в плазме газового разряда. Эта плёнка заметно ухудшала оптические параметры зеркала в видимой и ИК – областях спектра, но препятствовала окислению

поверхности при лазерном «выгорании» поглощающих включений. Ввиду низкой микротвёрдости меди, очистка оптической поверхности зеркал стандартными методами, применяемыми в оптической промышленности (путём протирки ватой, пропитанной растворителями), не позволяет полностью восстановить их оптическое качество. В этом случае вата и частицы пыли, попавшие на зеркало, оставляют микроцарапины на его поверхности, что заметно ухудшает оптическое качество. Сей факт и послужил причиной разработки бесконтактной технологии химической очистки зеркал азеотропной смесью на основе тетрафтордибромэтана, с помощью которой проводилась реставрация зеркал по окончании цикла эксплуатации. После очистки повторно замерялся КЗО.

Показано, что при длительной работе зеркал в атмосфере активной среды лазера возможно создание условий лазерной очистки, а сочетание её с последующей химической обработкой позволило не только сохранить оптическое качество зеркал, но и даже несколько увеличить коэффициент отражения (с 98,5% до $\geq 99\%$). Таким образом, достигнут практический результат – многолетняя работа зеркал происходила без заметного необратимого ухудшения основных оптических параметров, что позволило предложить метод лазерно-химической очистки металлических поверхностей.

Глава 7 посвящена исследованию возможности применения поликристаллических алмазов (ПА) для изготовления оптики мощных лазеров, а также некоторых других высокотехнологичных изделий. Проведён краткий анализ технологий получения и обработки алмаза; эффективность применения алмаза показана на примере некоторых новых высокотехнологичных устройств, таких как приборы силовой оптики и силовой электроники.

Ранее показано (глава 5), что стойкость кристаллов в лазерном луче во многом коррелирует с величиной энергии кристаллической решётки. В алмазе сочетание малой атомной массы углерода и сильной ковалентной связи определяет его уникальные оптические, механические и физико-химические свойства. Выращиваемые в настоящее время кристаллы алмаза пока не полностью соответствуют требованиям к оптике импульсных лазеров из-за высокой концентрации поглощающих включений. Однако, даже получаемый в настоящее время материал уже широко применяется для изготовления окон мощных технологических щелевых CO_2 – лазеров.

В данной работе испытания лазерного окна на основе поликристаллического алмаза были смоделированы с использованием серийно выпускаемого промышленностью непрерывного иттербиевого волоконного лазера ЛС – 10 фирмы ООО НТО «ИРЭ-Полус» мощностью до 10 кВт ($\lambda = 1,07$ мкм). Это обусловлено следующими причинами:

- волоконные лазеры активно применяются в промышленности, имеют стабильную, регулируемую мощность, распределение в пятне, близкое к Гауссовскому, и поэтому удобны при эксплуатации;

- для эксперимента были выбраны пластины ПА, имеющие коэффициент поглощения на длине волны этого лазера существенно больший, чем величина $\beta_{10,6}$. Поэтому наблюдавшиеся термооптические эффекты соответствовали результатам воздействия непрерывного CO_2 – лазера мощностью несколько десятков кВт.

Также, полученные результаты могут быть полезны для оценки перспектив применения алмазной оптики для лазеров, как видимого, так и ближнего ИК – диапазонов, несмотря на то, что в этой области эффективно используются традиционные оптические материалы: стекла, сапфир и т.д. Следует отметить, что помимо твердотельных лазеров ($\lambda \sim 1,06$ мкм), кислородно-йодного лазера ($\lambda \sim 1,3$ мкм), активно развиваются лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой, излучающие в области $\sim 0,9$ мкм [9].

Для проведения экспериментов была разработана и изготовлена специальная конструкция узла охлаждения из бескислородной меди.

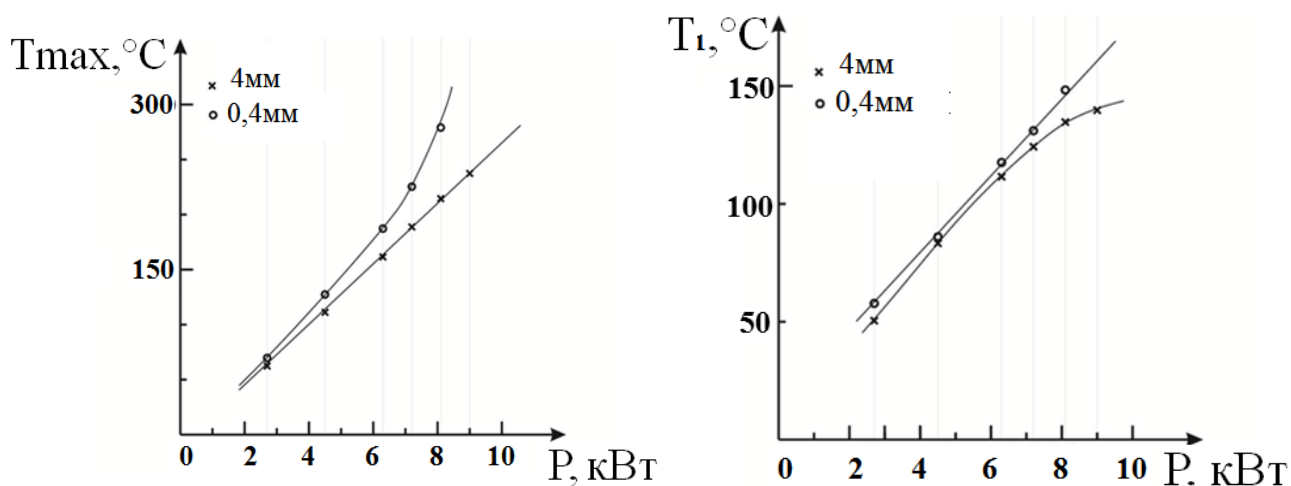


Рисунок 5 – Зависимость максимальной температуры T разогрева окна от мощности P в пятнах с $\varnothing 4$ мм и $\varnothing 0,4$ мм. T_{\max} – разогрев в центре; T_1 – разогрев в 3 мм от центра

В качестве образцов использовали пластины из ПА $\varnothing 25 \times 1,3$ мм³ с $\beta_{1,07} \sim 0,45$ см⁻¹, что в 5 - 10 раз выше, чем $\beta_{10,6}$. Регистрировали распределение излучения, прошедшего через окно, и динамику распределения температур в пределах окна (с помощью тепловизора) при размерах облучённых зон $\varnothing 4$ мм и $\varnothing 0,4$ мм и времени экспозиции до 10 с. То есть условия теплообмена в водоохлаждаемой пластине ПА были близки к стационарным. Мощность лазера на образце постепенно повышали от 1 до 9 кВт. При большем пятне ($\varnothing 4$ мм) нагрев носит линейный характер, а при фокусировке в пятно $\varnothing 0,4$ мм получена нелинейная зависимость

разогрева центра диска (T_{\max}) от мощности излучения P (рисунок 5).

Подобранный режим охлаждения позволил не ухудшать качество прошедшего луча при плотности мощности до 7 МВт/см^2 , что позволяет корректировать возникающую тепловую линзу. Так же важно оптимизировать расход охлаждающей жидкости (воды). На рисунке 6 наглядно показано как пониженный расход воды (2 л/мин при пятне $\varnothing 0,4 \text{ мм}$ и мощности 2,7; 4,5; 7,2; 8,1 кВт за время 10 с и 9 кВт за время 5 с) влияет на распределение излучения в луче.

Также в экспериментах исследовалось специально разработанное и изготовленное А.Д. Дроботом и В.В. Морщаковым 25-слойное интерференционное зеркало на алмазной подложке. Коэффициент отражения на $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ составлял $\sim 99,5 \%$. Диэлектрическое неохлаждаемое зеркало на ПА разрушилось через 1 с при воздействии излучения 7,0 кВт (плотность мощности - $8,2 \text{ МВт/см}^2$). Заметных изменений в качестве отражённого излучения до достижения этого порога не зафиксировано.

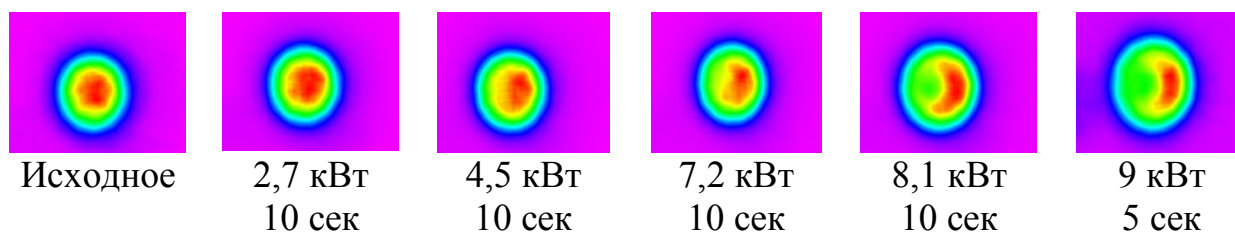


Рисунок 6 - Распределение интенсивности прошедшего излучения в случае пониженного расхода воды – 2 л/мин при пятне $\varnothing 0,4 \text{ мм}$ и мощности 2,7; 4,5; 7,2; 8,1 кВт за время 10 с и 9 кВт за время 5 с

Известно, что монокристаллические алмазы обладают гораздо лучшими оптическими свойствами, чем ПА. Однако, их габаритные размеры недостаточны для изготовления реальных окон мощных лазеров. С уменьшением длины волны эта разница становится ещё более заметной. Полученные данные позволили предложить использовать для изготовления лазерных окон комбинированные алмазные пластины с центральной монокристаллической зоной и поликристаллической периферией. В этом случае центральный монокристалл с хорошими оптическими свойствами может использоваться для вывода излучения, а периферийная поликристаллическая часть предназначена для вакуумирования и эффективного охлаждения.

Преимущества ПА имеют место при использовании не только в лазерной оптике, но и в силовой электронике. В данной работе после проведения анализа свойств алмаза, в качестве объекта испытаний были выбраны СВЧ нагрузки 50 Ом, обычно выполняемые на подложках из поликора (керамика на основе Al_2O_3). Проведены испытания устройств, в

которых поликор был заменен на алмаз; для эксперимента был выбран так называемый «серый алмаз» с теплопроводностью ~ 10 Вт/см \times К, то есть вдвое ниже, чем у оптических ПА. Установлено, что применение таких подложек из ПА на порядок увеличило рассеиваемую мощность нагрузок. Пластины исследуемого ПА, являющиеся технологическим браком для применения в оптике, могут быть эффективно использованы в силовой электронике.

В главе 8 подводятся некоторые практические итоги изучения физико-химических особенностей материалов для создания на их основе силовой оптики CO₂ – лазеров и исследования лазерных систем, выполненных в АО «НЦЛСК «Астрофизика».



Рисунок 7 - Общий вид экспериментальной установки стенда для исследования характеристик импульсных электроразрядных лазеров. Лазерные кюветы с окнами Брюстера из монокристаллов NaCl диаметром 300 мм. Размеры рабочего объёма 1-й секции $\sim 10 \times 10 \times 40$ см

Проведена оптимизация параметров резонатора мощного импульсного CO₂ – лазера. Приведены экспериментальные данные об улучшении характеристик четырёхсекционного импульсного электроразрядного CO₂ – лазера (рисунок 7) [А10] на основе практических рекомендаций и выводов работы. Резонатор лазера длиной 3000 мм был образован вогнутым зеркалом из бескислородной меди марки МОБ с радиусом кривизны 40000 мм и плоскопараллельной прозрачной пластиной в качестве выходного зеркала. Как правило, выходное зеркало выполняло также функцию выходного окна между активной средой лазера и атмосферой. Диаметр зеркал - 160 мм. Оптические параметры медных зеркал и результаты

исследования их свойств приведены в главе 6. Выходные зеркала - это плоскопараллельные пластины, изготовленные либо из монокристаллов германия, результаты исследования которых, изложены в главах 3 и 4, либо из монокристаллов NaCl (главы 3 и 5).

На рисунках 8 и 9 представлены зависимости энергии лазерного импульса (E) от длины активной среды (L) и от коэффициента отражения выходного зеркала (K).

В результате проведённых исследований, сочетая оптимизацию оптических характеристик зеркал резонатора и параметров легко ионизируемых присадок в активную среду, удалось получить выходную энергию излучения 820 Дж. КПД преобразования электрической энергии накачки в энергию выходного лазерного излучения составил 22%. Удельный съём энергии выходного излучения в этом случае удалось довести до 51 Дж/л, а полный КПД – до 13%. Этот результат в настоящее время является рекордным для лазеров данного типа.

Проведены экспериментальные исследования когерентного сложения излучения двух широкоапертурных импульсных CO_2 – лазеров. В экспериментах использовались две лазерные кюветы, объединенные общим модовым и активным объемами телескопическим неустойчивым резонатором со сходящимся лучом. При одновременном включении всех секций двух лазеров, объединённых этой схемой, суммарная энергия достигала 200 Дж в импульсе (мощность в пике до 2×10^8 Вт), при расходимости $\sim 10^{-3}$ рад. На расстоянии 263 м зарегистрирована интерференция при сложении 2-х пучков излучения импульсных CO_2 – лазеров при минимальном угле схождения лучей.

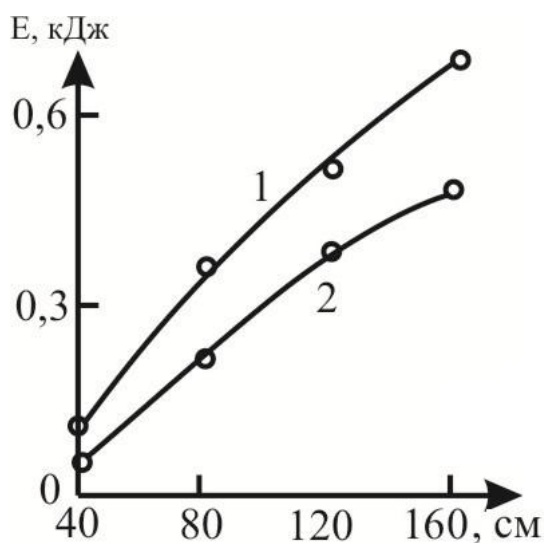


Рисунок 8 - Зависимости энергии лазерного импульса E от длины активной среды L (1 - присадка 3 – n - пропил-амин, 2 - присадка метаксиллол)

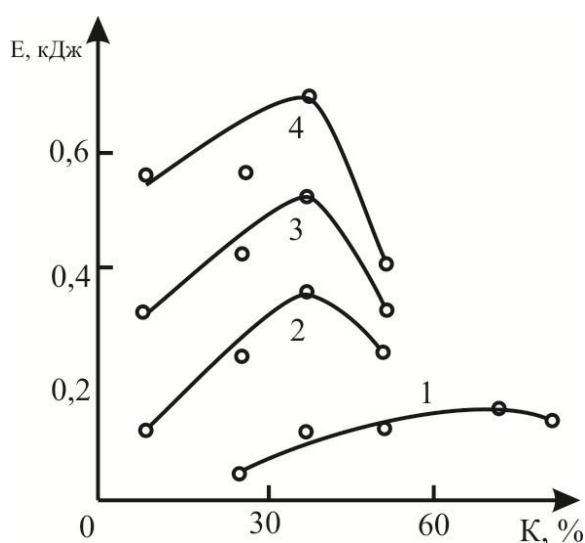


Рисунок 9 - Зависимости энергии лазерного импульса E от коэффициента отражения выходного зеркала K при L (см) = 40 (1); 80 (2); 120 (3) и 160 (4)

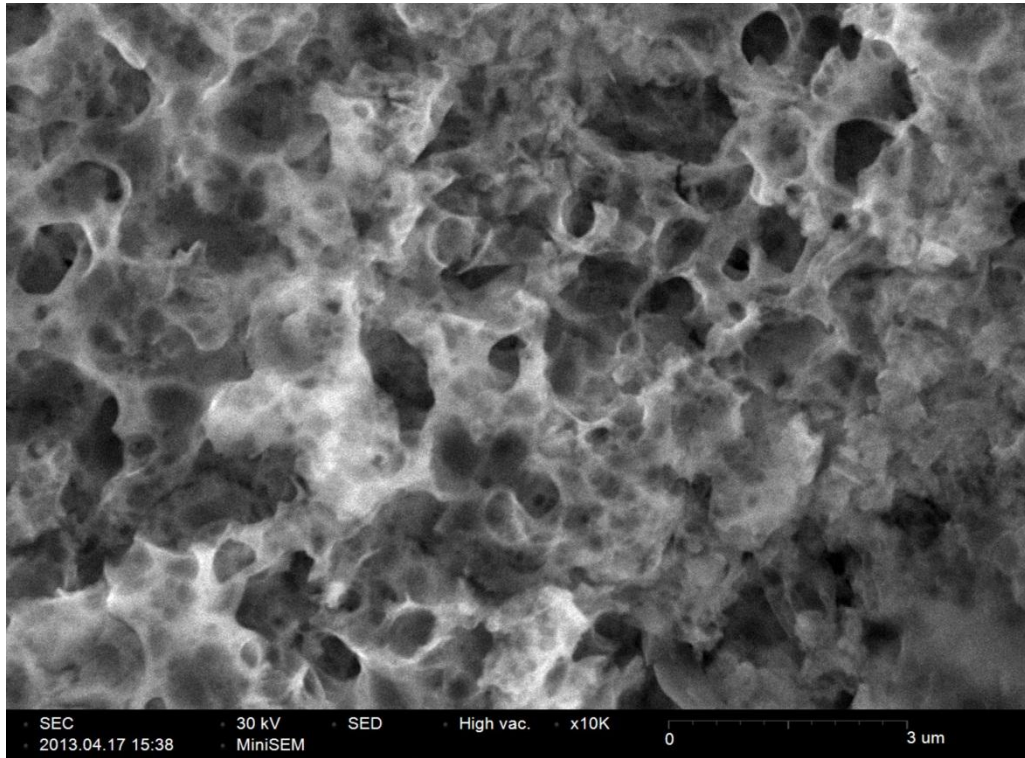


Рисунок 10 - Участок поверхности дюралюминия (РЭМ) после воздействия

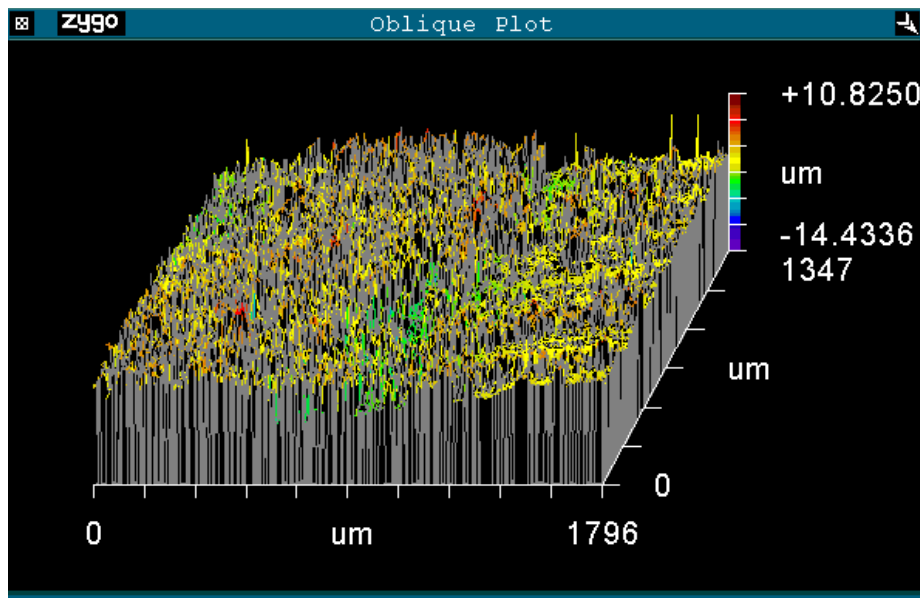


Рисунок 11 – трехмерное изображение характерного участка зоны облучения, интерферометр «Zygo», размер кадра 1796 x 1347 мкм

Выполнены исследования микроструктуры поверхности оксидированного алюминия методами электронной (рисунок 10) и атомно - силовой микроскопии, рентгеноспектрального анализа и оптической профилометрии (рисунок 11) после воздействия на площадь $\sim 100 \text{ см}^2$ мощного импульса CO_2 – лазера ($E \sim 500 \text{ Дж}$, $\tau = 5 \text{ мкс}$, в головной части $\sim 200 \text{ нс}$). Слой Al_2O_3 , имевший толщину $\sim 7 \text{ мкм}$, в результате неравновесного нагрева вплоть до температуры испарения,

модифицировался с образованием поликристаллического конгломерата из ряда стехиометрических и не стехиометрических фаз оксидов алюминия и его соединений с марганцем (Mn) и с магнием (Mg).

Известно (глава 6), что при плотности мощности $\geq 10^7$ Вт/см² в атмосфере воздуха воздействие микросекундного импульса CO₂ – лазера на металл инициирует низкопороговый оптический пробой воздуха. Плазма поглощает большую часть излучения и экранирует металл от его дальнейшего воздействия. Поэтому на металле обычно, как и в настоящем случае, не наблюдается следов поражения. Но на оксидированном дюралюминии (Д16) мы наблюдали модификацию поверхности.

Рентгеноструктурные исследования показали, что элементный состав покрытия, которое после лазерного воздействия несколько утонилось, не изменился и состоит преимущественно из Al и кислорода с примесью серы, а фазовый состав изменился существенно. В зоне облучения образовался поликристаллический конгломерат, состоящий из многочисленных неравновесных фаз оксидов Al (моноклинный, гексагональный, ромбоэдрический Al₂O₃) и его соединений с Mn (Al₆Mn, Al₁₉Mn₄) и с Mg (Al₃Mg₂, Al₁₂Mg₁₇, AlMg). По итогам экспериментов сделан вывод, что излучение пика импульса поглощается в Al₂O₃ с $\beta \sim 10^4$ см⁻¹ и нагревает слой оксида толщиной ~ 1 мкм до температуры кипения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы и приводится список публикаций по теме диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена крупная научная проблема по разработке физических основ применимости оптических материалов для изготовления реальных зеркал мощных импульсных CO₂ – лазеров и особенностей их эксплуатации. Впервые проведено комплексное исследование возможности получения предельно возможных значений оптической стойкости реальных материалов для оптики, в первую очередь – резонаторной, мощных импульсных CO₂ – лазеров.

Сформулирован единый методический подход к исследованию оптической стойкости таких различающихся между собой материалов, как медь и её сплавы, поликристаллический алмаз, полупроводниковые, щёлочно-галогенидные и некоторые другие ионные монокристаллы.

Воздействие излучения импульсного CO₂ – лазера на эти материалы производилось в условиях максимально приближенных к реальным. Размеры облучённой зоны в большинстве экспериментов составляли ~ 1 см². Эксперименты проводились как на образцах материалов, серийно производимых промышленностью, так и на уникальных, специально изготовленных образцах. Целенаправленно поставленные физические

эксперименты сочетались с многолетним мониторингом резонаторных зеркал двух активно эксплуатирувавшихся мощных импульсных CO_2 – лазеров с выходной энергией до 820 Дж в импульсе длительностью $4 \div 5$ мкс.

Основные результаты работы

1. Показано, что в монокристаллах LiF , CaF_2 и в поликристаллах MgF_2 (КО-1) экспериментально измеренное значение коэффициента поглощения $\beta(\nu)$ в диапазоне $8 \div 12$ мкм подчиняется теоретической зависимости – правилу Урбаха. Это позволяет с довольно высокой точностью рассчитывать величину β на коротковолновом краю фундаментальной полосы поглощения, в области малой прозрачности.

2. Впервые исследовано влияние изотопической чистоты монокристаллов германия на фоновые пики поглощения в ИК – области. Обнаружено, что решёточные пики поглощения на частотах $\nu = 850, 755, 650 \text{ см}^{-1}$, наблюдаемые в монокристаллах германия природного изотопического состава, в моноизотопных кристаллах сдвигались, причём в монокристаллах ^{70}Ge наблюдался рост частоты полосы поглощения - ν , а в ^{74}Ge ν уменьшался по сравнению с монокристаллами природного изотопического состава.

3. Впервые проведено комплексное исследование реальной оптической стойкости большинства материалов прозрачной силовой оптики CO_2 – лазеров. Показано, что при плотности мощности излучения $\geq 10^7 \text{ Вт/см}^2$, в большинстве случаев основной причиной повреждения оптического элемента является плазма низкопорогового пробоя воздуха, возникающего у поверхности образца, в которой поглощается периферийная часть воздействующего лазерного импульса.

4. Впервые теоретически и экспериментально исследованы нелинейные потери при прохождении излучения с плотностью мощности $10^7 \div 4 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ через прозрачные материалы. Обнаружена и обоснована экспоненциальная зависимость потерь излучения в кристалле от ширины запрещённой зоны материала, объясняемая поглощением излучения на генерируемых «горячих» неравновесных носителях заряда.

5. Проведенный анализ повреждений оптических элементов из германия показал, что излучением мощного импульса CO_2 – лазера повреждается только приповерхностный слой материала. Лавинный пробой в приповерхностном слое германия приводит к генерации неравновесных носителей заряда, которые поглощают часть излучения и предохраняют объём материала от повреждения.

6. Впервые систематически исследован и объяснён процесс возникновения объёмных полостей в щёлочно-галогидных кристаллах (ЩГК) при воздействии лазерного импульса. Получены зависимости

размера «лазерных пор» в различных ЦГК от условий воздействия, параметров воздействующего лазерного импульса и энергии кристаллической решётки. Изучена кинетика термического отжига возникших в ЦГК «лазерных пор», предложен и экспериментально подтверждён механизм их залечивания.

7. Впервые исследовано влияние конгломератов точечных дефектов, полученных путём воздействия ионизирующей радиации, целенаправленным введением в кристалл различных примесей, последующей термообработкой, на процесс «лазерного» порообразования в ЦГК.

8. Впервые обнаружен эффект аномального массопереноса при облучении сплава медь - хром импульсом CO_2 – лазера с плотностью мощности $\sim 10^6 \div 10^7 \text{ Вт/см}^2$ в направлении перпендикулярном лазерному лучу. Зафиксирована миграция большеугловых границ зерен, формирование блочной структуры, а также «растворение» частиц хрома в матрице, что возможно лишь при аномальном увеличении коэффициента диффузии (на несколько порядков). Результат объяснён передачей энергии лазерного импульса в упругую волну.

9. Впервые показано, что при длительной эксплуатации зеркал из меди и её сплавов возможно создание условий лазерной очистки рабочей поверхности, что в сочетании с последующей химической обработкой позволяет не только сохранить в процессе эксплуатации оптическое качество зеркал, но даже несколько увеличить коэффициент отражения по сравнению со свежеполированной поверхностью.

10. Проведено исследование особенностей взаимодействия импульса CO_2 – лазера с поверхностью оксидированного дюралюминия. Впервые показано, что коэффициент поглощения излучения CO_2 – лазера в оксиде алюминия составляет $\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$ и пиковая часть лазерного импульса поглощается в тонком слое оксида, нагревая его до температуры кипения.

11. Благодаря комплексной модернизации, в том числе оптимизации параметров зеркал резонатора, удалось значительно увеличить выходную энергию излучения импульсного электроразрядного CO_2 – лазера. Получено КПД преобразования электрической энергии в энергию излучения до 22%. Полный КПД установки достигал 13%, а удельный съём энергии излучения – 51 Дж/л. Эти результаты являются рекордными для подобных лазеров.

12. Впервые исследована оптическая стойкость образцов окон и зеркал из поликристаллического алмаза (ПА), получаемого химическим осаждением из газовой фазы, при воздействии излучения непрерывного волоконного иттербиевого лазера ($\lambda = 1,07 \text{ мкм}$, мощность до 10 кВт). Установлено, что водоохлаждаемые алмазные окна и зеркала способны выдерживать воздействие излучением с мультимегаваттной плотностью мощности. Впервые обнаружено, что даже при перепаде температур между

центром окна (зеркала) и водоохлаждаемым краем, составляющем сотни градусов, качество распределения лазерного луча, прошедшего через окно в таких условиях, не ухудшалось, что позволяет эффективно корректировать неизбежно возникающую тепловую линзу.

13. Путём использования разработанных оптических элементов на реальной трассе длиной 263 м экспериментально получено когерентное сложение излучения 2-х импульсных CO_2 – лазеров на удалённом объекте.

14. Впервые разработаны, изготовлены и успешно испытаны монокристаллические германиевые окна диаметром 420 мм, которые были использованы в составе уникального 4-х лучевого лазерного комплекса.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих печатных работах:

Монографии

A1. Атаманюк, В. М. Взаимодействие лазерного излучения с материалами оптико-электронной техники / В. М. Атаманюк, О. В. Володин, И. В. Дяченко, Н. С. Захаров, А. Ф. Коваленко, А. В. Козлов, С. А. Комаров, Т. А. Михайлова, А. В. Никонов, **В. Е. Рогалин**, М. В. Сахаров, И. П. Суханов, Я. А. Суханов, А. В. Федичев. - Сергиев Посад.: ЦФТИ МО РФ, 2004. – 176 с.

A2. Захаров, Н. С. Стойкость оптических кристаллов к воздействию широкоапертурного инфракрасного лазерного излучения / Н. С. Захаров, **В. Е. Рогалин**. - Сергиев Посад.: 12 ЦНИИ МО, 2009. - 229 с.

Статьи в журналах, включённых в списки ВАК, Web of Science, Scopus

A3. **Рогалин, В. Е.** Моделирование процессов проскальзывания на границе на бикристаллах хлористого серебра / **В. Е. Рогалин**, А. В. Шалимова, М. П. Шаскольская // Изв. АН СССР, сер. Физическая. - 1976. – Т. 41. - № 7. - С. 1537 - 1541.

A4. Левинзон, Д. И. Исследование монокристаллов профильного германия, облучённых импульсным CO_2 – лазером / Д. И. Левинзон, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, Е. П. Рыкун, А. Л. Трайнин, И. С. Ценина, Э. Г. Шейхет // Изв. АН СССР, сер. Физическая. – 1979. - Т. 43. - № 9. - С. 2001 - 2005.

A5. Ровинский, Р. Е. Изменение структуры сплава медь-хром, облучённого импульсом CO_2 – лазера / Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, В. М. Розенберг, М. Д. Теплицкий // Физ. и хим. обраб. матер. – 1980. - № 3. - С. 7 - 11.

A6. **Рогалин, В. Е.** О взаимодействии импульса ИК – излучения с центрами окраски в NaCl / **В. Е. Рогалин**, Н. А. Тищенко,

М. П. Шаскольская // ЖТФ. – 1980. - Т. 50. - № 5. - С. 1077 - 1079.

A7. **Рогалин, В. Е.** Кинетика отжига пор, возникающих при точечном микровзрыве в объёме кристалла / **В. Е. Рогалин**, Т. И. Самойлова, М. П. Шаскольская // Кристаллография. – 1980. – Т. 25. - № 5. - С. 1100 - 1101.

A8. **Рогалин, В. Е.** О порообразовании в щёлочно-галоидных монокристаллах под действием импульса электромагнитного излучения / **В. Е. Рогалин**, Т. И. Самойлова, Н. А. Тищенко, М. П. Шаскольская // ФТТ. – 1980. – Т. 22. - № 12. – С. 3549 - 3554.

A9. Ровинский, Р. Е. Оптические свойства и области применения полупроводниковых монокристаллов германия / Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, В. А. Шершель // Изв. АН СССР, сер. Физическая. – 1983. – Т. 47. - № 2. - С. 406 - 409.

A10. Аполлонов, В. В. Мощный электроразрядный CO₂ – лазер с добавками в смесь легкоионизуемых веществ / В. В. Аполлонов, Ю. М. Васьковский, М. И. Жаворонков, А. М. Прохоров, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, Н. Д. Устинов, К. Н. Фирсов, И. С. Ценина, В. А. Ямщиков // Квант. электроника. – 1985. – Т. 12. - № 1. - С. 5 - 9.

A11. Макшанцев, Б. И. Влияние диэлектрических образований на поверхности металла на оптический пробой / Б. И. Макшанцев, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин** // Квант. электроника. – 1985. - Т. 12. - № 1. - С. 22 - 28.

A12. Андреев, С. А. Перспективные направления исследований в области эффективной транспортировки лазерных пучков через фазоискажающие среды / С. А. Андреев, Н. П. Андреева, М. С. Барашков, И. М. Бельдюгин, В. К. Демкин, В. Л. Евстигнеев, В. Н. Жегалин, М. И. Крымский, К. В. Митин, **В. Е. Рогалин**, А. М. Серегин, А. С. Степанов, М. А. Талалаев, В. В. Филатов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2010. - № 5. - С. 23 – 43.

A13. **Рогалин, В. Е.** Стойкость алмазной оптики в луче мощного волоконного лазера / **В. Е. Рогалин**, Е. Е. Ашкинази, А. Ф. Попович, В. Г. Ральченко, В. И. Конов, С. М. Аранчий, М. В. Рузин, С. А. Успенский // Матер. электрон. техники. – 2011. - № 3. - С. 41 - 44.

A14. **Рогалин, В. Е.** Влияние поглощающих микронеоднородностей на оптическую стойкость щелочно-галоидных монокристаллов / **В. Е. Рогалин** // Изв. РАН, сер. Физическая. – 2012. - Т. 76. - № 11. – С. 1346 – 1358.

A15. **Рогалин, В. Е.** Поликристаллические алмазы; новые перспективы силовой оптики и электроники / **В. Е. Рогалин**, С. М. Аранчий // Интеграл. – 2012. - № 5 (67). - С. 80 – 82.

A16. **Рогалин, В. Е.** Прозрачные материалы для мощных импульсных CO₂ – лазеров / **В. Е. Рогалин** // Матер. электрон. техники. – 2013. - № 2. - С. 11 - 18.

A17. **Рогалин, В. Е.** Оптическая стойкость медных зеркал для мощных импульсных ТЕА CO_2 – лазеров / **В. Е. Рогалин** // Материаловедение. – 2013. - № 9. - С. 34 - 42.

A18. **Рогалин, В. Е.** Исследование влияния изотопической чистоты на оптические свойства германия / **В. Е. Рогалин**, И. С. Ценина, И. А. Каплунов // Научно-техн. ведомости С-Пб. Гос. политех. ун-та. -2013. - № 4-1 (183). - С. 353 – 358.

A19. **Рогалин, В. Е.** Оптические свойства металлических зеркал для CO_2 – лазеров / **В. Е. Рогалин**, И. А. Каплунов // Изв. Сочинского гос. ун-та. - 2013. - № 4-2 (28). - С. 120 - 127.

A20. Каплунов, И. А. Исследование возможности лазерно-химической очистки металлических поверхностей / И. А. Каплунов, **В. Е. Рогалин**, С. А. Филин // Цветные металлы. - 2014. - № 7. – С. 72 – 75.

A21. **Rogalin, V. E.** Experimental Study of Coherent Summation of Radiation from Two Widely Aperture Pulsed CO_2 – lasers / **V. E. Rogalin**, I. A. Kaplunov, I. K. Babaev, Ju. M. Vaskovsky, M. I. Zhavoronkov, V. M. Ivanov, A. S. Korenev // J. of Nano - and electronic physics. – 2014. -V. 6. - № 3. – P. 03004 (3pp).

A22. Каплунов, И. А. О фундаментальном поглощении фторидов кальция, магния, лития в области 8 – 12 мкм / И. А. Каплунов, **В. Е. Рогалин**, И. С. Ценина // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117. - № 4. - С. 68 – 70.

A23. Каплунов, И. А. Влияние примесного и изотопического состава монокристаллического германия на оптическое пропускание в области 520 – 1000 cm^{-1} / И. А. Каплунов, **В. Е. Рогалин**, М. Ю. Гавалян // Оптика и спектроскопия. – 2015. – Т. 118. - № 2. - С. 254 – 260.

A24. Аранчий, С. М. О возможности создания проекционной рентгеновской фотолитографической технологии / С. М. Аранчий, К. М. Крымский, М. И. Крымский, **В. Е. Рогалин** // Радиотехника и электроника. – 2015. - Т. 60. - № 3. - С. 325 - 328.

Публикации в других изданиях

A25. Куликов, В. Г. Прохождение излучения импульсного CO_2 – лазера через полупроводниковые кристаллы / В. Г. Куликов, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, А. А. Холодилов // Тез. докл. IV Всес. сов. по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. Л-д, 1978. – С. 243 - 244.

A26. Ровинский, Р. Е. Прохождение излучения импульсного CO_2 – лазера через диэлектрические кристаллы / Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, А. А. Холодилов, В. М. Чутко // Тез. докл. IV Всес. сов. по нерезонансному взаимодействию оптического излучения с веществом. Л-д, 1978. – С. 321 - 322.

A27. Ровинский, Р. Е. О нелинейном поглощении импульса излучения

СО₂ – лазера при его прохождении через оптические материалы / Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин** // Тез. докл. V Всес. сов. «Нерезонансное взаимодействие оптического излучения с веществом». Л-д, 1981. - С. 346 - 347.

A28. Левинзон, Д. И. Поглощение ИК – излучения в германии / Д. И. Левинзон, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, Е. П. Рыкун, И. С. Ценина, В. А. Шершель // Сб. «Материалы IX сов. по получению профилированных кристаллов и изделий способом Степанова и их применение в народном хозяйстве». Л-д, 1982. - С. 123 - 126.

A29. Бабаева, Н. А. Нелинейные процессы при отражении импульса излучения 10,6 мкм от поверхности металла / Н. А. Бабаева, З. Е. Багдасаров, Р. Е. Ровинский, **В. Е. Рогалин**, И. С. Ценина // Тез. докл. VI Всес. конф. «Нерезонансное взаимодействие оптического излучения с веществом». Вильнюс, 1984. - С. 302 - 303.

A30. Дробот, А. Д. Деградация и восстановление медных зеркал импульсного СО₂ – лазера / А. Д. Дробот, М. К. Ильин, Р. М. Овнанян, **В. Е. Рогалин**, С. А. Филин, В. И. Ямпольский // Электронная техника, сер. Лаз. техн. и оптоэлектрон. – 1990. - Вып. 2(54). - С. 49 - 51.

A31. **Рогалин, В. Е.** Поликристаллические алмазы - новый материал для силовой оптики и электроники / **В. Е. Рогалин** // Матер. конф. VII Межд. форума «Высокие технологии XXI века - 2006». Москва, 2006. - С. 169 - 172.

A32. Валуев, В. В. Реализация согласованных СВЧ нагрузок с большой мощностью рассеяния (500 Вт и более) на теплоотодах из поликристаллических алмазов / В. В. Валуев, А. П. Васильев, В. Н. Дроздов, В. Н. Козлов, В. И. Конов, А. Ф. Попович, В. М. Пятаков, В. Г. Ральченко, **В. Е. Рогалин** // Научн. вестн. МИРЭА. – 2008. - № 2 (5). - С. 4 - 10.

A33. **Рогалин, В. Е.** Поликристаллические алмазы - новый конструкционный материал для силовой оптики и электроники / **В. Е. Рогалин** // Матер. конф. V Межд. форума «Лазерные и оптические системы и технологии». Москва, 2009. – С. 12 – 18.

A34. **Рогалин, В. Е.** Оптическая стойкость прозрачных материалов для мощных импульсных СО₂ – лазеров / **В. Е. Рогалин** // Сб. статей «Лазерно – оптические системы и технологии». М., ФГУП «НПО Астрофизика», 2009. - С. 70 – 77.

A35. **Рогалин, В. Е.** Новые перспективы для силовой оптики и электроники после создания технологии получения поликристаллических алмазов / **В. Е. Рогалин**, С. М. Аранчий // Матер. XVII Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2011. - С. 93 – 99.

A36. **Рогалин, В. Е.** Термооптические эффекты в алмазной пластине, облучаемой мощным волоконным лазером / **В. Е. Рогалин**, Е. Е. Ашкинази,

А. Ф. Попович, В. Г. Ральченко, В. И. Конов, В. Г. Каменев, С. М. Аранчий, М. В. Рузин, С. А. Успенский // Матер. XVIII Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2012. - С. 262 – 264.

А37. Крымский, М. И. Расчет высокоэффективного генератора 2-й гармоники CO₂ – лазера на кристаллах теллура с использованием теплоотводов из поликристаллического алмаза / М. И. Крымский, К. В. Митин, **В. Е. Роголин**, С. М. Аранчий, Д. С. Парамонов // Матер. XIX Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2013. - С. 219 – 225.

А38. Крымский, М. И. Пути повышения эффективности дискового лазера за счет использования алмазных теплоотводов / М. И. Крымский, **В. Е. Роголин**, С. М. Аранчий, М. В. Рогожин // Матер. XIX Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2013. - С. 226 – 231.

А39. **Роголин, В. Е.** Лазерно-химическая очистка металлических поверхностей / **В. Е. Роголин**, С. А. Филин // Вестник ТвГУ, серия «Химия». – 2013. - Вып. 18. - С. 68 - 73.

А40. Аранчий, С. М. О возможности создания лазерно-плазменного излучателя для рентгеновской фотолитографии / С. М. Аранчий, М. И. Крымский, К. М. Крымский, **В. Е. Роголин** // Труды XX Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2014. – С. 108 - 112.

А41. Каплунов, И. А. Влияние изотопической чистоты на оптическое пропускание германия / И. А. Каплунов, **В. Е. Роголин**, М. Ю. Гаваян // Сб. докл. VI Межд. конгр. «Цветные металлы и минералы». Красноярск, 2014. - С. 651 - 658.

А42. Рогожин, М. В. Моделирование термомеханических процессов в выходном окне высокоомощного CO₂ – лазера / М. В. Рогожин, **В. Е. Роголин**, М. И. Крымский // <http://research-journal.org/>: Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. URL: <http://research-journal.org/?p=15298> 2015. №7 (38). - Ч. 2. - С. 33 - 40.

А43. **Роголин, В. Е.** Оптические свойства сапфира в области 10 мкм / **В. Е. Роголин**, И. А. Каплунов, И. С. Ценина, М. С. Андреева // Матер. XXI Всерос. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар, 2015. – С. 55 - 61.

А44. Разработка технологии получения силовой оптики из поликристаллического алмаза для мощных лазеров: итоговый научно-технический отчет о НИР, шифр «Алмаз-Л», рег. № 122/1. М. 2010. – 104 с.

Изобретения

А45. Турский, М. Ю. Способ финишной обработки полупроводниковых элементов / М. Ю. Турский, В. Ф. Пахомов,

Н. Г. Потоскаева, **В. Е. Рогалин** // Авторское свидетельство СССР. - № 1127475. - 1984.

А46. Дробот, А. Д. Способ очистки оптической поверхности изделий из металлов и их сплавов / А. Д. Дробот, М. К. Ильин, Э. А. Нарусбек, **В. Е. Рогалин**, С. А. Филин, В. И. Ямпольский // Патент РФ на изобретение. - № 2049155. - Бюл. Изобр. № 33. - 1995.

А47. Дробот, А. Д. Способ очистки поверхности изделий из металлов и их сплавов / А. Д. Дробот, М. К. Ильин, **В. Е. Рогалин**, С. А. Филин, В. И. Ямпольский // Патент РФ на изобретение. - № 2070621. - Бюл. Изобр. № 35. - 1996.

А48. Валуев, В. В. Мощная микрополосковая нагрузка / В. В. Валуев, А. П. Васильев, В. Н. Дроздов, В. Н. Козлов, В. И. Конов, А. Ф. Попович, В. М. Пятаков, В. Г. Ральченко, **В. Е. Рогалин** // Патент РФ на полезную модель. - № 81850. - Заявка № 2008141259. - Приоритет полезной модели 20 октября 2008.

А49. Рогожин, М. В. Мощный лазер / М. В. Рогожин, **В. Е. Рогалин**, М. И. Крымский // МКИ Н 01 S 3/08, заявка №2015131054 от 27.07.2015.

А50. **Рогалин, В. Е.** Способ лазерной маркировки изделия из алюминия или его сплава / **В. Е. Рогалин**, С. А. Филин, О. М. Кугаенко, Е. Е. Ашкинази, Н. А. Рогалина // МКИ В 32 В 15/04; В 23 К 26/00; В 23 К 26/18; В 23 К2 6/40; В 41 М 5/24, заявка № 2015139965 от 21.09.2015.

А51. Каплунов, И. А. Способ определения оптической однородности в прозрачных материалах / И. А. Каплунов, **В. Е. Рогалин**, С. А. Третьяков, Н. А. Рогалина // МКИ G01N 21/84, G01N 21/21 Заявка на патент № 2015121076 от 03.06.2015 г.).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Витteman, В. CO₂ – лазер / В. Витteman. - М. : Мир, 1990. - 360 с.
2. Баранов, Г. А. Мощные импульсные CO₂ – лазеры высокого давления и их применения / Г. А. Баранов, А. А. Кучинский // Квантовая электроника. - 2005. - Т. 35. - № 3. - С. 219 - 229.
3. Бычков, Ю. И. Импульсный CO₂ – лазер с энергией излучения 5 кДж / Ю. И. Бычков, Е. К. Карлова, Н. В. Карлов, Б. М. Ковальчук, Г. П. Кузьмин, Ю. А. Курбатов, В. И. Манылов, Г. А. Месяц, В. М. Орловский, А. М. Прохоров, А. М. Рыбалов // Письма в ЖТФ. - 1976. - Т. 2. - № 5. - С. 212 - 216.
4. Бабаев, И. К. Мощные CO₂ – и CO – лазеры / И. К. Бабаев, В. В. Синайский, А. И. Финогенов // Сб. «Лазерные и оптические системы». - М.: ГНЦ НПО Астрофизика, 1994. - С. 64 - 71.
5. Haberberger, D. S. Fifteen terawatt picosecond CO₂ – laser system / D. S. Haberberger, S. Tochitsky, C. Joshi // Opt. Express. – 2010. - V. 18. - № 17. - P. 17865 - 17875.
6. Ашурлы, З. И. Электроразрядный импульсный CO₂ – лазер для исследовательских целей / З. И. Ашурлы, Ю. М. Васьковский, И. А. Гордеева, Л. В. Малышев, Р. Е. Ровинский, А. А. Холодилов // Квантовая электроника. - 1980. - Т. 7. - № 7. - С. 1456 - 1460.
7. Смирнов, Ю. М. Монокристаллы германия для инфракрасной техники / Ю. М. Смирнов, И. А. Каплунов // Материаловедение. - 2004. - № 5. - С. 48 - 52.
8. Райзер, Ю. П. Лазерная искра и распространение разрядов / Ю. П. Райзер. - М. : Наука, 1974. - 308 с.
9. Богачев, А. В. Лазер на парах цезия с диодной накачкой и прокачкой лазерной среды по замкнутому циклу / А. В. Богачев, С. Г. Гаранин, А. М. Дудов, В. А. Ерошенко, С. М. Куликов, Г. Т. Микаелян, В. А. Панарин, В. О. Паутов, А. В. Рус, С. А. Сухарев // Квант. электрон. - 2012. - Т. 42. - № 2. - С. 95 - 98.

Технический редактор А.В. Жильцов
Подписано в печать 11.07.2016. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 2,5. Тираж 100 экз. Заказ № 285.
Тверской государственный университет
Редакционно-издательское управление
Адрес: Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.
Тел. РИУ: (4822) 35-60-63.