

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
на диссертацию Рогалина Владимира Ефимовича  
«Стойкость материалов силовой оптики  
к воздействию мощных импульсов излучения CO<sub>2</sub>-лазеров»,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Предметом диссертационной работы В. Е. Рогалина является экспериментальное изучение физики процессов, ограничивающих реальную оптическую стойкость элементов силовой оптики действующих мощных лазерных систем на углекислом газе. CO<sub>2</sub>-лазеры, отличающиеся высоким КПД и способностью давать киловатты оптической мощности в непрерывном режиме и килоджоули энергии в импульсе, прочно занимают свою нишу в современном, весьма обширном и многообразном, лазерном мире, находя все новые применения. В своем спектральном диапазоне, от 9 до 11 мкм, по энергетическим параметрам они и сегодня остаются вне конкуренции. Для изучения в лабораторных условиях процессов оптического разрушения высокопрозрачных или высокоотражающих материалов не обязательно иметь лазер с очень большой энергией в импульсе, если использовать острую фокусировку луча в пятно размером в сотню микрон. Подавляющее большинство исследований именно так и проводится. Перенос получаемых при этом результатов на условия эксплуатации мощных широкоапертурных лазерных систем – самостоятельная и весьма непростая задача. В представленной работе основные эксперименты проводятся с длиннофокусной оптикой и при сантиметровом размере лазерного пятна на образце, т. е. задача масштабирования на оптические элементы реальных высокомошных лазеров перестает быть проблемой, и уже одно это обстоятельство обеспечивает данной диссертации актуальность и новизну. Проведенные В. Е. Рогалиным исследования выполнены на высоком профессиональном уровне, дают большое количество ценной информации и находятся на переднем крае фундаментальной и прикладной науки о физике конденсированного состояния вещества.

Поскольку длина волны излучения CO<sub>2</sub>-лазера на порядок больше, чем в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра, то требования к качеству обработки оптических поверхностей здесь существенно ниже. Однако обычные оптические стекла и кварц здесь совершенно непрозрачны, поэтому приходится использовать другие материалы, моно- либо поликристаллические. В литературном обзоре диссертации автором подробно рассмотрены требования, предъявляемые к оптике CO<sub>2</sub>-лазеров, выявлены критерии выбора оптических материалов для лазеров высокой мощности и проанализированы

данные по свойствам имеющихся веществ. В. Е. Рогалиным исследовано поведение под мощным лазерным импульсом большинства оптически прозрачных в среднем ИК диапазоне материалов, практически применимых в качестве элементов проходной лазерной оптики (13 видов ионных и полупроводниковых кристаллов), и определены энергетические пороги их стойкости к воздействию микросекундного импульса  $\text{CO}_2$ -лазера. Обнаружено, что основным фактором, лимитирующим работу реального оптического элемента, является низкопороговый пробой воздуха вблизи его поверхности, возникающий при плотности лазерной энергии  $\leq 10 \text{ Дж/см}^2$ . На основании анализа полученных результатов сделан выбор в пользу монокристаллов  $\text{NaCl}$  и  $\text{Ge}$ , процессам лазерного воздействия на которые посвящены две отдельные главы диссертации.

Предварительные исследования зависимости коэффициента оптического поглощения монокристаллического германия от его удельного электрического сопротивления позволили определить оптимальную степень легирования этого материала. Экспериментально доказано, что оптическое повреждение германиевой оптики всегда зарождается на поверхности. Сначала локально, на поглощающих дефектах и неоднородностях приповерхностного слоя, а при дальнейшем наращивании плотности лазерной мощности – по всей площади лазерного пятна, из-за развития процесса лавинного оптического пробоя в поле электромагнитной волны. Поглощение свободными носителями электронной лавины в нарушенном при полировке приповерхностном слое экранирует объем материала от действия лазерного излучения, а высокая механическая прочность не позволяет поверхностным разрушениям проникать вглубь. В результате оптическое повреждение остается локализованным в слое толщиной несколько микрон, а дорогостоящие крупногабаритные оптические детали удается восстанавливать путем повторной переполитровки.

Проведенные в работе эксперименты показали, что если низкопороговый лазерный пробой воздуха вблизи поверхности германия может происходить без видимых последствий, то в случае щелочно-галогидных кристаллов это приводит к необратимым разрушениям. Их невысокая механическая прочность, пластичность, облегченное трещинообразование вдоль плоскостей спайности приводят к необратимым разрушениям, проникающим в объем материала. Кроме того, в объеме кристаллов промышленной чистоты наблюдается образование микрополостей размером в десятки микрон с плотностью до  $10^5 \text{ см}^{-3}$ . Автором подробно изучен механизм возникновения полостей – оптический пробой на субмикронных включениях и поглощающих неоднородностях материала. Продемонстрировано экспериментально, что возникшие полости залечиваются, а механические напряжения в их окрестности исчезают в процессе отжига

кристаллов при атмосферном давлении. Предложено таким образом реставрировать поврежденные оптические элементы мощных  $\text{CO}_2$ -лазеров.

Значительное внимание в работе уделено процессам взаимодействия лазерного импульсного излучения с поверхностью высокоотражающих медных зеркал. Разработана методика точного измерения коэффициентов отражения, близких к 100%. Проведены исследования процессов отсечки отраженного лазерного импульса за счет поглощения в плазме низкорогового пробоя воздуха вблизи поверхности. Изучена микроструктура дефектов, возникающих в материале зеркала в результате лазерного воздействия. При этом обнаружены признаки аномального массопереноса, объясняемые эффективной передачей энергии в упругую волну. Практические результаты данных исследований связаны с наблюдаемыми эффектами очистки поверхности зеркала под действием лазерного импульса. Разработана методика восстановления свойств лазерных зеркал, деградировавших в ходе длительной эксплуатации.

Чрезвычайный интерес представляют проведенные в работе исследования нового материала лазерной оптики – поликристаллического алмаза. Результаты модельных экспериментов по воздействию на охлаждаемое алмазное окно сфокусированного непрерывного лазерного пучка мощностью 10 кВт убедительно демонстрируют перспективность такого оптического элемента.

Достоверность полученных результатов обеспечена комплексным характером исследований, проведенных с применением современных методов оптического эксперимента. Обоснованность сделанных выводов подтверждается количественными оценками, выполненными на базе существующих теоретических представлений.

Новизна результатов обусловлена не только применением лазерных источников высокой мощности, позволяющих использовать фокальное пятно больших размеров, но и широтой подхода к решению имеющихся проблем, систематическим и всесторонним характером проведенных исследований.

Как и во всякой большой работе, в рецензируемой диссертации нашлись основания для ряда замечаний.

1. Коэффициент поглощения германия  $\beta$  определялся из спектров пропускания. При этом удавалось измерять  $\beta$  на уровне  $10^{-2} \text{ см}^{-1}$ . Из текста непонятно, какова погрешность этих измерений? При толщине  $d = 2 \text{ см}$  приведенное автором условие для минимальных ошибок измерений  $0,17 < \beta d < 2,6$  заведомо не выполняется.
2. Остается не ясным, каким именно образом строилась зависимость коэффициента нелинейных потерь от ширины запрещенной зоны материала для щелочно-галоидных кристаллов, если они либо разрушались первым же импульсом, либо быстро деградировали с ростом числа импульсов.



3. Соотношение между амплитудой пиковой части лазерного импульса и уровнем мощности на его пологой части через 0,5 мкс после его начала изменялось в диапазоне величин от 1,5 до 4. Автор не пояснил, каким образом это делалось.

Сделанные замечания не ставят под сомнение достоверность полученных в работе новых научных результатов и обоснованность сделанных выводов и не влияют на общую высокую оценку диссертации. Результаты работы отличаются большой научной значимостью и возможностью их использования не только в эксперименте и теории, но и на практике. Диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям пп.9-14 "Положения о присуждении ученых степеней" №842 от 24.09.2013, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Владимир Ефимович Рогалин, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Содержание диссертации достаточно полно и точно отражено в автореферате, многочисленных публикациях и докладах на российских и международных конференциях.

Официальный оппонент,  
ведущий научный сотрудник  
Лаборатории оптической прочности и  
диагностики кристаллов ИФТТ РАН,  
доктор физико-математических наук

Горбунов Александр Васильевич

26 сентября 2016 г.

Шифр специальности оппонента – 01.04.07 «физика конденсированного состояния»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт физики твердого тела Российской академии наук (ИФТТ РАН)»,  
142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипяна, 2  
раб. тел.: 8-496-5228314, эл. адрес: [gorbunov@issp.ac.ru](mailto:gorbunov@issp.ac.ru)

Подпись ведущего научного сотрудника ИФТТ РАН, доктора физико-математических наук, Горбунова А. В. заверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН  
доктор физико-математических наук

Абросимова Г. Е.,