

На правах рукописи

УДК 621.373.826

РОГОЖИН МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МИНИМИЗАЦИИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ И  
ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В ВЫХОДНЫХ ОКНАХ  
МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2019 г.

Работа прошла апробацию на кафедре квантовой электроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Кандидат технических наук, доцент  
Крымский Михаил Ильич

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

Защита состоится 27.12.2019 в 11:00 на заседании диссертационного совета ФЭФМ.01.04.02.001 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.

С Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (государственного университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-fiziko-matematicheskienauki.php>

Работа представлена 21.10.2019 г. в Аттестационную комиссию Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п. 3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике»

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время в промышленности начали находить активное применение непрерывные мультикиловаттные лазеры. Такие лазеры имеют мощность от нескольких десятков киловатт до нескольких мегаватт и могут применяться в различных лазерных системах, способных решать разнообразные задачи на широком диапазоне расстояний, например, осуществлять дистанционную обработку радиоактивных объектов при авариях на АЭС [1, 2], или резку металлических конструкций при пожаротушении на нефте- и газопромыслах. Рассматривается использование мощных лазеров для разрушения ледяного покрова [3]. В качестве более отдаленной перспективы рассматривается возможность использования лазеров для передачи энергии на космические объекты. Для этого могут использоваться мощные СО и СО<sub>2</sub> лазеры [4], а также отдельные разновидности химических и твердотельных лазеров, способных генерировать необходимую мощность.

Во многих лазерных системах подобного типа необходимо применение выходного элемента — окна или полупрозрачного зеркала, разделяющего активное вещество и атмосферу. Одним из основных факторов, ограничивающих технические характеристики мультикиловаттных лазеров, является недостаточно высокая лучевая стойкость выходной оптики. Так, расходимость и предельно достижимая интенсивность излучения мощной лазерной системы в настоящее время определяются, как правило, свойствами выходного элемента. Поскольку мощность излучения может достигать сотен киловатт, а расстояние до объекта — десятков километров, на эффективность такого рода установок в чрезвычайно высокой степени влияют термомеханические и термооптические процессы, протекающие в выходном окне лазерной системы [5].

Следует также принимать во внимание дороговизну экспериментальных исследований стойкости силовой оптики ввиду высокой стоимости крупноапертурных оптических элементов, в частности выходных окон, рыночная стоимость которых колеблется от нескольких сотен до многих тысяч долларов за один образец. В таблице ниже представлены примеры рыночной стоимости некоторых выходных окон, найденные в открытых источниках.

Таблица 1. Примеры стоимости крупноапертурных выходных окон

Материал	Размеры (мм)	Стоимость	Источник
ZnSe	Ø 50,8 x 8	950 €	[6]
Сапфир	160 x 95 x 12	3700 €	[6]
ZnSe	Ø 75 x 6	1700 \$	[7]
Ge	Ø 75 x 5	995 \$	[7]
CVD-алмаз	Ø 25,4 x 1,2	10 950 \$	[8]

Поскольку приведенные выше позиции представляют собой серийные изделия, цены на которые взяты из каталогов готовой продукции различных производителей, попытаемся исходя из примерной цены 1 мм<sup>3</sup> материала оценить стоимость уникальных крупногабаритных оптических окон, цены на которые определяются индивидуально в ходе переговоров и недоступны в открытых источниках.

Таблица 2. Оценочная стоимость крупногабаритных несерийных образцов выходных окон

Материал	Размеры (мм)	Цена 1 мм <sup>3</sup>	Оценочная стоимость
ZnSe	Ø 500 x 50	0,06 €	~ 600 000 €
Сапфир	Ø 500 x 50	0,02 €	~ 200 000 €
ZnSe	Ø 500 x 50	0,064 \$	~ 630 000 \$
Ge	Ø 500 x 50	0,045 \$	~ 440 000 \$
CVD-алмаз	Ø 300 x 7,5	18 \$	~ 9 500 000 \$

Учитывая также тот факт, что производство столь крупногабаритной оптики носит несерийный характер, можно сделать вывод о чрезвычайно высокой стоимости таких образцов.

Перечисленные выше оценки показывают, что углублённое численное моделирование необходимо для минимизации дорогостоящих экспериментальных исследований работы выходного окна мощного лазера.

### Степень разработанности темы исследования

Математические основы процессов, протекающих в выходном окне лазера, были описаны в 70-х годах 20го века в работах М. Sparks, М. Cottis, Н.С. Chow [6 – 8]. В данных работах были рассмотрены эффекты, возникающие в выходной оптике под воздействием нагрева вследствие поглощения выходного излучения, а также под

воздействием разности давлений между рабочей средой и атмосферой. Они базируются на технологических возможностях изготовления выходного окна классической конфигурации из оптического материала с предельно низкими значениями коэффициента поглощения. Среди отечественных публикаций по данной тематике стоит отметить работы В.В. Аполлонова, в частности [9], Я.И. Малашко, В.А. Шмакова и др.

Вопросы инженерного расчета, проектирования, контроля и технологии изготовления систем формирования мощного лазерного излучения были подробно рассмотрены в работах российских исследователей Я.И. Малашко и М.Б. Наумова [10]. В работе В.А. Шмакова [11] рассмотрены механизмы разрушения твёрдых прозрачных материалов электромагнитным полем, что является одной из причин, ограничивающих предельную выходную мощность светового пучка, а также исследованы особенности термоупругого состояния при различных режимах теплового удара.

При этом следует отметить, что значительная часть опубликованных по теме исследования работ посвящена описанию результатов экспериментов по исследованию лучевой стойкости конкретных образцов выходных окон под воздействием мощного лазерного излучения, в то время как вопросы разработки инструментов численного моделирования процессов, протекающих в выходных окнах, а также обоснования с их помощью методов снижения вносимых окном искажений, рассмотрены недостаточно подробно.

### **Цель работы**

Настоящая диссертационная работа была выполнена с целью создания математического аппарата для моделирования методов и средств минимизации термомеханических и термооптических искажений, возникающих в выходных окнах мощных лазеров, и разработке на его основе физических моделей и принципов конструирования комбинированных выходных окон мощных лазеров с увеличенной оптической стойкостью.

### **Задачи работы**

1. Разработка математической модели функционирования выходного окна

мощного непрерывного лазера, включающей в себя теплофизическую, механическую и оптическую части.

2. Разработка вычислительного инструмента (программы для ЭВМ), позволяющего численно моделировать поведение выходного окна мощного лазера на основе разработанной математической модели.

3. Описание и численное обоснование метода компенсации вносимых окном оптических искажений за счет регулировки фокусного расстояния корректирующего телескопа.

4. Описание и численное обоснование работы выходного алмазного поликристаллического окна с центральной монокристаллической областью для щелевого CO<sub>2</sub> лазера.

5. Описание и численное обоснование целесообразности использования комбинированных выходных окон с непрозрачной центральной областью в мощных лазерах с неустойчивым резонатором.

6. Описание и численное обоснование метода дополнительного охлаждения двухкомпонентных выходных окон с непрозрачной центральной областью при помощи криоаккумулятора.

### **Научная новизна**

Работа содержит ряд новых результатов, в частности:

1. Для мощных лазеров с компактным выходом излучения впервые предложена и численно обоснована целесообразность применения комбинированных алмазных окон, центральная часть которых изготовлена из монокристалла, а периферийная – из поликристалла.

2. Для лазеров с неустойчивым резонатором с кольцевым профилем выходного излучения впервые предложена и численно обоснована целесообразность применения комбинированных окон с непрозрачной центральной областью.

3. Впервые предложен и численно обоснован метод дополнительного охлаждения двухкомпонентных выходных окон с непрозрачной центральной областью при помощи криоаккумулятора.

## **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в построении модели функционирования выходного лазерного окна, учитывающей различные механизмы, влияющие на качество выходного излучения, а именно: эффект термолинзы за счет наличия температурного градиента, утолщение окна вследствие его неравномерного нагрева, а также изгиб поверхности окна вследствие разности давлений атмосферы и активной среды.

Практическая значимость работы заключается в разработанных и численно обоснованных методах, позволяющих различными способами повысить качество выходного излучения мощных лазеров. Данные методы могут быть применены в различных областях техники, требующих использования высокоомощного лазерного излучения.

## **Методология и методы исследования**

Для решения поставленных задач были использованы: теория теплопроводности, теория упругости, конечно-разностные методы численного решения дифференциальных уравнений (в частности, метод Самарского).

## **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование комбинированного выходного окна из поли- и монокристалла алмаза в щелевом  $\text{CO}_2$ -лазере мощностью 5 кВт с гауссовым профилем луча позволяет снизить степень оптических искажений выходного излучения, вызванных эффектом термолинзы, на величину порядка 25 %.

2. Использование окон комбинированной конструкции с непрозрачной центральной областью в лазерах с неустойчивым резонатором при кольцевом лучевом нагружении дает прирост максимальной мощности при  $H/D = 1:15 \sim 13$  %, при  $H/D = 1:20 \sim 10$  %, при  $H/D = 1:25 \sim 4$  %. При этом использование двухкомпонентной конструкции в тонких окнах с  $H/D = 1:30$  и тоньше нецелесообразно и приводит к уменьшению лучевой стойкости.

3. Применение окон комбинированной конструкции с непрозрачной центральной областью позволяет использовать для изготовления центральной области окна гораздо более дешевые непрозрачные материалы, что позволяет добиться

значительной финансовой экономии при изготовлении крупноапертурных оптических элементов, измеряемой десятками, а в отдельных случаях – сотнями тысяч долларов

4. Использование криоаккумулятора на фазовом переходе в качестве дополнительного теплоотвода в комбинированном окне. Расчет проведен на примере окна из поликристаллического алмаза диаметром 20 см с непрозрачной центральной областью из меди диаметром 8 см позволило увеличить максимальную интенсивность излучения на удаленном объекте на величину порядка 40 % при мощности выходного излучения  $P = 100$  кВт и длительности функционирования установки  $t = 1$  мин. При этом рассчитанные оптимальные массогабариты криоаккумулятора  $H = (3 \pm 0,5)$  см,  $m = (280 \pm 45)$  г позволяют прикрепить его к непрозрачной области комбинированного выходного окна без принципиального изменения массогабаритов всей системы.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на:

1. XIX Всероссийской конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2013 г.);
2. IX Международном форуме «Оптические системы и технологии (OPTICS-EXPO 2013)» (Москва, 2013 г.);
3. VI Международной конференции «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» (Москва, 2015 г.);
4. Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2016» (Москва, 2016 г.);
5. XXII Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2016 г.);
6. XXIII Международной конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред» (Краснодар, 2017 г.);
7. VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2017 г.);
8. XI Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2017 г.);
9. VII Международной конференции по фотонике и информационной



оптике (Москва, 2018 г.);

10. XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2018 г.);

11. Всероссийской научно-технической конференции «Расплетинские чтения – 2018» (Москва, 2018 г.);

12. XX Харитоновских чтениях «Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии» (Саров, 2018 г.);

13. "International Conference on Lasers and Optics (OPTICS-2018)" (Осака, Япония, 2018 г.).

### **Публикации**

По результатам работы опубликованы 8 статей (в т.ч. 5 статей из списка ВАК, 5 статей, входящих в Scopus и Web of Science), тезисы 11 докладов на конференциях, получен 1 патент на изобретение

### **Личный вклад автора**

Все результаты, опубликованные в настоящей работе, получены автором лично либо при его непосредственном участии.

### **Объём и структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объём диссертации составляет 111 страниц машинописного текста, включая 25 рисунков, 13 таблиц и список литературы из 78 наименований

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, содержится постановка задачи и кратко изложены основные результаты работы по главам.

**В главе 1** рассмотрены особенности функционирования выходных оптических окон мощных непрерывных лазеров, а также представлены основные характеристики материалов, используемых для их изготовления.

В разделе 1.1 представлены общие сведения об источниках мощного лазерного излучения и выходных оптических окнах. Представлен обзор типов мощных лазеров в ближнем и среднем ИК-диапазоне.

В разделе 1.2 описаны основные механизмы, приводящие к разрушению материала окна под воздействием лазерного излучения.

В разделе 1.3 описаны основные механизмы возникновения оптических аберраций, вносимых выходной оптикой мощных лазеров.

В разделе 1.4 представлены основные требования к материалам, а также перечислены некоторые теплофизические и оптические характеристики наиболее распространенных материалов, используемых для изготовления лазерных окон.

**В главе 2** рассмотрена математическая модель, описывающая поведение выходного окна, находящегося под воздействием мощного непрерывного лазерного излучения. На основе данной модели предложен метод максимизации интенсивности излучения на удаленном объекте за счет подбора оптимальной мощности излучения, а также корректировки фокусного расстояния наводящего телескопа с учетом вносимых окном искажений. Результаты главы 2 были опубликованы в [А3].

Рассматривалось выходное окно в виде плоскопараллельного диска радиуса  $R$  и толщины  $H$ , изготовленного из прозрачного на длине волны лазера материала и находящегося в охлаждаемой оправе. Расчёт проводился в предположении, что распределение лазерного излучения по пятну, обеспечиваемое неустойчивым резонатором, – кольцевое, с внутренним диаметром кольца равным половине внешнего. Распределение интенсивности излучения внутри кольца, для упрощения, было задано равномерным. Апертура луча была принята равной 90 % диаметра

выходного окна (10 % диаметра отведено на оправу).

В качестве входных данных модели использовались:

1. геометрические параметры окна;
2. параметры материала, из которого изготовлено окно;
3. параметры излучения;
4. параметры окружающей среды.

В качестве выходных данных предполагалось получить распределения температур и механических напряжений в объеме окна, а также максимально достижимую при заданных параметрах окна интенсивность излучения на удаленном объекте и оптимальное значение фокусного расстояния наводящего телескопа, при котором достигается данный максимум.

В разделе 2.2 приведена математическая модель, описывающая функционирование выходного окна, находящегося под воздействием излучения непрерывного лазера. Математическая модель, использованная для вычислений, состояла из трех применяемых последовательно частей – теплофизической, механической и оптической [А2, А3].

На первом этапе осуществлялся расчет температурного поля в объеме окна, для чего решалось уравнение теплопроводности с граничными условиями, учитывающими поглощение излучения как в объеме окна, так и на его поверхности, а также периферийное жидкостное охлаждение и конвективный теплообмен с окружающей средой. Уравнение теплопроводности с граничными условиями, составляющее теплофизическую часть модели, решались разностным методом с использованием локально одномерной схемы А.А. Самарского, которая является абсолютно устойчивой и обладает свойством суммарной аппроксимации.

На втором этапе на основе полученного температурного поля производился расчет потенциала смещения и возникающих в окне механических напряжений. Анизотропия упругих констант материалов окна в рамках рассматриваемой модели не учитывалась. Сравнение максимальных рассчитанных значений температуры и эквивалентного механического напряжения с их критическими значениями позволяло моделировать порог разрушения окна для рассматриваемых условий.

На третьем этапе производился расчет оптических искажений, вносимых окном при заданных параметрах. Рассматривались три физических механизма, влияющих на расходимость выходящего излучения:

1. образование термолинзы вследствие температурной зависимости показателя преломления –  $dn/dT$ ;
2. неравномерное утолщение окна в результате температурного расширения;
3. изменение кривизны поверхностей окна из-за разности давлений между активной средой и атмосферой.

Фотоупругий эффект, а также атмосферные искажения в рамках данной модели не рассматривались.

Далее на основе отношения осевой интенсивности излучения на расстоянии  $L$  от окна к интенсивности на выходе из окна для гауссова луча

$$\frac{I_L}{I_0} = \frac{L^{-2}}{(F^{-1}(w_0) - L^{-1})^2 + z_R^{-2}}, \quad (1)$$

зная фокусное расстояние  $F_w$ , индуцированное выходным окном, с учетом выражения

$$F(r) = \frac{1}{F_w^{-1}(r) + F_{tel}^{-1}}. \quad (2)$$

вычислялось оптимальное значение фокусного расстояния наводящего телескопа  $F_{tel}$ , обеспечивающее максимизацию интенсивности излучения на удаленном объекте  $I_L$ .

В разделе 2.3 подробно описано применение разностного метода Самарского для численного решения теплофизической части модели.

В разделе 2.4 описаны критерии выбора материалов для изготовления выходных окон мощных лазеров, обоснованы рассматриваемые диапазоны диаметров, а также определено минимально допустимое соотношение толщины окна к его диаметру для рассматриваемых материалов.

В представленных далее результатах расстояние  $L$  от лазера до исследуемого объекта принято равным метеорологической дальности прямого видения для нормальных условий наблюдения – 5 км. На рисунке 1 представлены зависимости осевой интенсивности излучения, сфокусированного на удаленном объекте  $I_5$ , от мощности излучения  $P$  для окон различных диаметров, изготовленных из ZnSe. Белыми символами на рисунке отмечены зависимости, при которых фокусное расстояние телескопа корректировалось для компенсации вносимых окном aberrаций,

черным – при которых фокусное расстояние телескопа было неизменным и равным расстоянию до объекта.

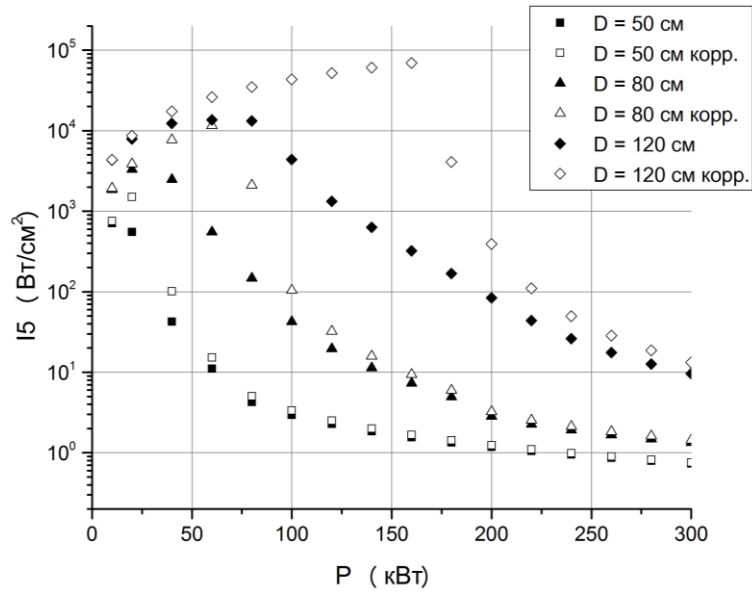


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения на объекте от мощности излучения при фиксированном (черные символы) и корректируемом (светлые символы) фокусном расстоянии телескопа, диаметре окна 50, 80, 120 см. Окно из ZnSe,  $\lambda = 10.6$  мкм.

На рисунке 2 изображены соответствующие значения оптимальной оптической силы телескопа  $F_{tel\ opt}^{-1}$ , обеспечивающие максимизацию интенсивности излучения на удаленном объекте  $I_5$  при заданных условиях.

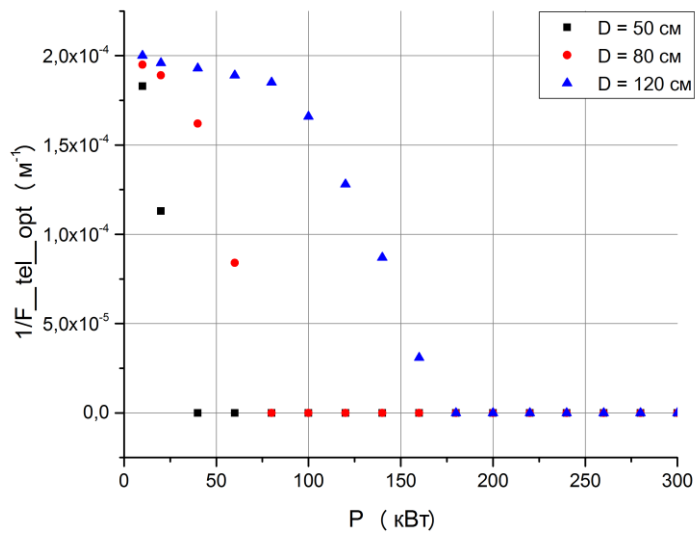


Рис. 2. Оптимальная оптическая сила телескопа как функция мощности при диаметре окна 50, 80, 120 см. Окно из ZnSe,  $\lambda = 10.6$  мкм

В таблице 1 указаны некоторые ключевые результаты численного моделирования, а именно:  $I_{5\ max}$  и  $I_{5\ max}^*$  – максимально достижимая в заданных условиях интенсивность излучения на расстоянии 5 км для случаев  $F_{tel} = L$  и  $F_{tel} = F_{tel\ opt}$  соответственно, а также уровни мощности  $P_{5\ max}$  и  $P_{5\ max}^*$ , при которых она достигается.

Таблица 1. Ключевые результаты моделирования

Материал	$\lambda$ , мкм	$D$ , см	$P_{5\ max}$ , кВт	$I_{5\ max}$ , кВт/см <sup>2</sup>	$P_{5\ max}^*$ , кВт	$I_{5\ max}^*$ , кВт/см <sup>2</sup>	Рост интенсивности, %
Алмаз	10.6	10	75	0,15	75	0,17	13
Алмаз	10.6	20	64	0,48	76	0,73	52
Алмаз	10.6	30	54	0,84	80	2,0	138
ZnSe	10.6	50	13	0,81	28	2,1	159
ZnSe	10.6	80	34	4,4	73	14	218
ZnSe	10.6	120	63	13	169	73	462
Кварц. стекло	1.3	50	7	23	26	130	465
Кварц. стекло	1.3	80	23	138	79	1 014	635
Кварц. стекло	1.3	120	49	719	210	6 068	744

В главе 3 предложены методы улучшения рабочих характеристик мощных лазеров за счет использования комбинированных выходных окон. Рассмотрены два варианта конструкции комбинированных оптических окон: с использованием поли- и монокристаллических алмазов для гауссова распределения интенсивности излучения в ближней зоне и с непрозрачной центральной областью для случая кольцевого распределения интенсивности соответственно. Результаты, изложенные в данной главе, были ранее опубликованы в [А4, А6].

В разделе 3.1 рассмотрены конструктивные решения построения окна в случае гауссова распределения интенсивности выходного излучения.

Современные технологии позволяют получить пластины монокристалла алмаза размерами до 10×10 мм, что в большинстве приложений недостаточно для изготовления целого окна. Однако в случаях, когда распределение интенсивности излучения лазера в ближней зоне близко к гауссовскому, целесообразно «усилить» центральную область окна, испытывающую максимальные лучевые нагрузки. Было

рассмотрено комбинированное окно, центральная область которого изготовлена из монокристалла алмаза, а периферийная – из поликристалла [A1]. Принципиальная схема указана на рис. 3.

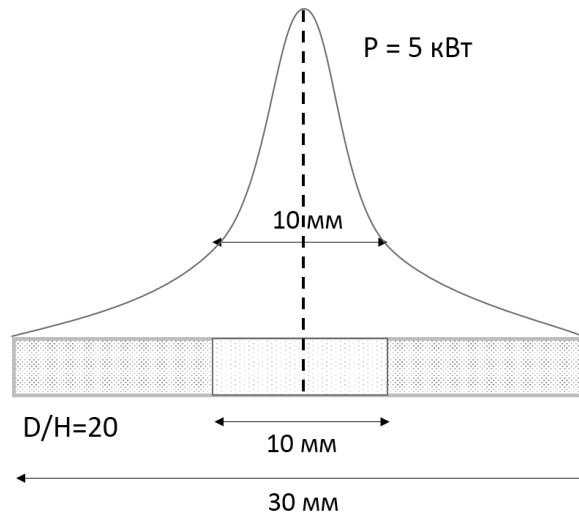


Рис. 3. Комбинированное окно из поли- и монокристалла алмаза под воздействием излучения с гауссовым профилем интенсивности

В разделе 3.1.1 изложена математическая модель двухкомпонентного выходного окна из поликристаллического алмаза с монокристаллической центральной областью.

На рис. 4 и 5 показаны профили температурного поля внутри окна  $T(r)$  и искажения волнового фронта  $\Delta l(r)$  для цельного окна из поликристаллического алмаза (черные символы) и составного окна описанной выше конструкции (белые символы) при мощности излучения  $P = 5 \text{ кВт}$ .

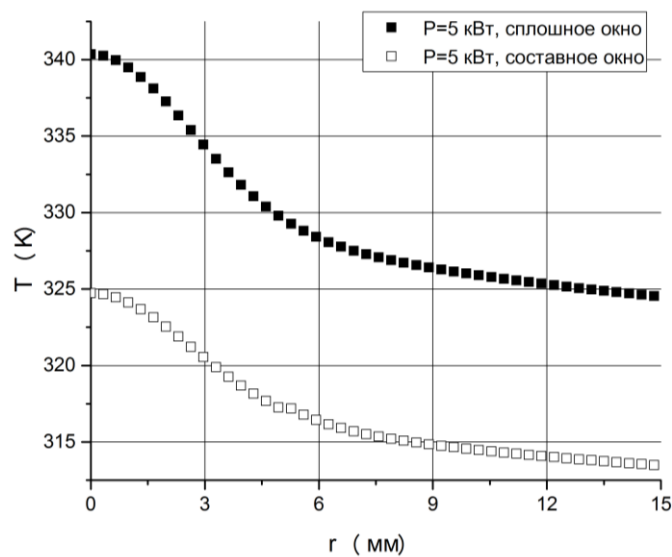


Рис. 4. Температурный профиль окна в плоскости  $z = 0$

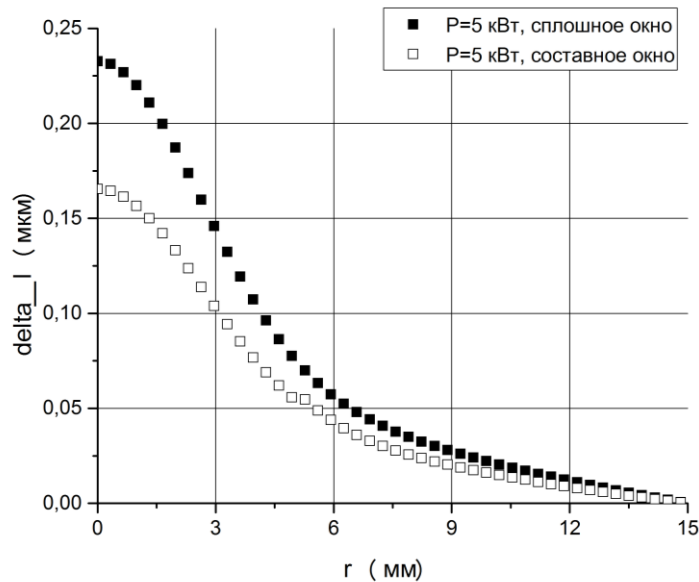


Рис. 5. Искажения волнового фронта при прохождении через окно

Также рассчитано, что при искажении волнового фронта на величину  $\lambda/10$  окно традиционной конструкции обеспечивает максимальную выходную мощность 19 кВт, в то время как окно с монокристаллической центральной областью позволяет достичь уровня выходной мощности в 26 кВт, что на 37 % превосходит первоначальное значение.

В разделе 3.2 рассмотрены конструктивные решения построения окна для случая кольцевого лучевого нагружения.

В мощных лазерах часто применяют неустойчивые резонаторы. В ближней зоне их излучение, как правило, имеет кольцевое распределение интенсивности, и центральная область выходного окна не подвергается воздействию излучения. Тогда она может быть изготовлена из другого, более дешевого и механически прочного материала, отделенного от прозрачной рабочей зоны пластичной вакуумирующей прокладкой. Рассмотрено выходное окно, центральная часть которого изготовлена из меди, а периферийная – из ZnSe, находящаяся под длительным воздействием излучения мощного CO<sub>2</sub>-лазера с кольцевым профилем интенсивности. Принципиальная схема указана на рис. 6.



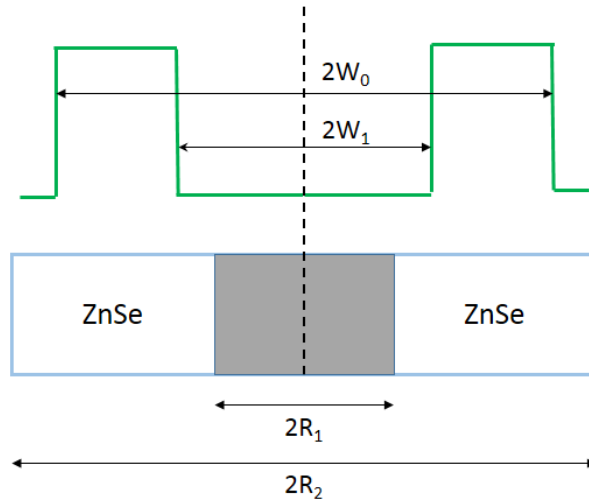


Рис. 6. Комбинированное окно под воздействием излучения с кольцевым профилем интенсивности

В разделе 3.2.1 изложена математическая модель двухкомпонентного выходного окна с непрозрачной центральной областью.

Была проведена серия численных экспериментов, в рамках которых вычислялась максимальная мощность излучения  $P_{max\_double}$ , которую способно выдержать комбинированное окно, изображенное на рис. 6. Данная мощность сравнивалась с соответствующей мощностью  $P_{max\_single}$  для сплошного окна аналогичных размеров, целиком изготовленного из ZnSe. Результаты представлены на рис. 7.

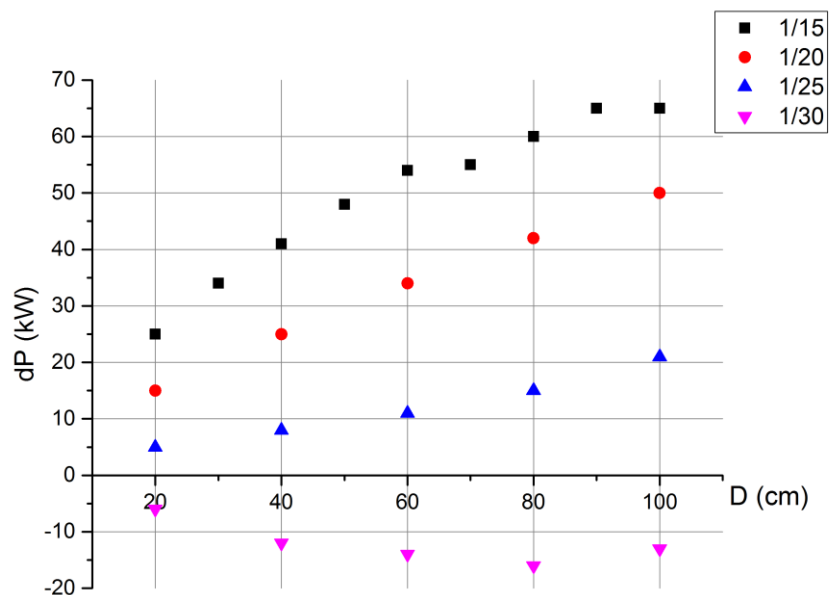


Рис. 7. Увеличение максимальной мощности излучения за счет использования комбинированного окна при различных соотношениях толщины к диаметру

Установлено, что использование окон комбинированной конструкции дает наибольший прирост максимально допустимой мощности излучения в случае толстых окон с большим диаметром. При этом использование двухкомпонентной конструкции в тонких окнах с  $H/D = 1:30$  нецелесообразно и приводит к уменьшению лучевой стойкости.

**В главе 4** изложен метод дополнительного охлаждения комбинированного выходного окна с непрозрачной центральной областью при помощи криоаккумулятора. Результаты, изложенные в данной главе, были ранее опубликованы в [A7, A16, A18]. Рассматривалось комбинированное выходное окно, центральная часть которого изготовлена из меди, а периферийная – из поликристаллического CVD-алмаза. Окно подвергалось воздействию излучения мощного CO<sub>2</sub>-лазера с кольцевым профилем интенсивности, работающего в непрерывном режиме. Дополнительное охлаждение обеспечивалось при помощи криоаккумулятора на фазовом переходе, представляющего собой цилиндр, изготовленный из пористого металла, поры которого заполнены веществом, осуществляющим фазовый переход в процессе поглощения тепла. Холодильник был прикреплен к непрозрачной области окна как показано на рис. 8, боковая и нижняя поверхности цилиндра были адиабатически изолированы.

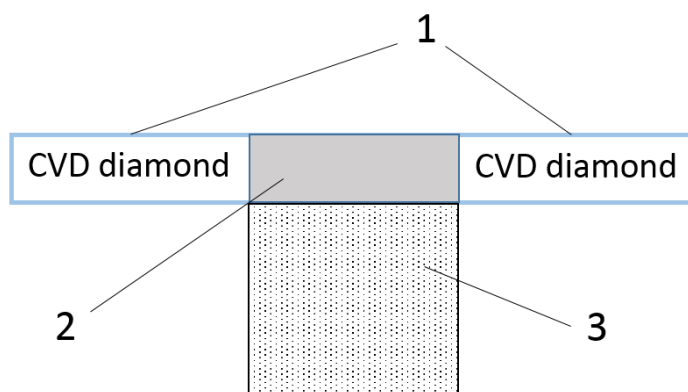


Рис. 8. Комбинированное выходное окно с холодильником на фазовом переходе. 1 – прозрачная периферийная часть, 2 – непрозрачная центральная часть, 3 – криоаккумулятор.

Необходимо было определить, на сколько возможно увеличить интенсивность лазерного излучения на удаленном объекте за счет дополнительного охлаждения выходного окна криоаккумулятором описанной выше конструкции, а также определить оптимальные материалы для изготовления рабочего тела и пористой

насадки, коэффициент пористости и высоту холодильника, при которых теплоотводящая способность системы и ее массогабариты будут оптимальными в рамках рассматриваемой задачи.

В разделе 4.2 изложена математическая модель двухкомпонентного окна с холодильником на фазовом переходе.

Раздел 4.3 посвящён выбору материалов пористо насадки и рабочего вещества криоаккумулятора. Изложены основные требования для рабочего вещества:

1. температура фазового перехода  $T_{\phi}$  такова, что активное вещество находится в твердом состоянии при эксплуатационных температурах внешней среды, однако позволяет избежать чрезмерного нагрева выходного окна вследствие поглощения доли лазерного излучения;
2. высокая удельная теплота фазового перехода  $\lambda_{\phi}$ ;
3. доступность и безопасность в эксплуатации.

В качестве оптимального материала рабочего вещества был выбран глицерин с температурой плавления  $T_{\phi} = 18^{\circ}\text{C}$ ,  $\lambda_{\phi} = 20,1 \times 10^4$  Дж/кг.

Материал пористой насадки криоаккумулятора должен обладать достаточно высокой теплопроводностью и, при этом, невысокой плотностью, с целью обеспечить минимальный вес системы при заданных у габаритах. Данным требованиям хорошо удовлетворяет алюминий, чья теплопроводность  $237$  Вт/(м×К) несколько уступает меди ( $401$  Вт/(м×К)), однако является гораздо более легким материалом (плотность  $2,7$  г/см<sup>3</sup> у алюминия против  $8,9$  г/см<sup>3</sup> у меди).

В разделе 4.4 определены оптимальные для заданных условий значения высоты  $H$  и коэффициента пористости насадки  $\Pi$  криоаккумулятора. Для определения оптимальных параметров была рассчитана максимальная температура  $T_{max}$ , которая достигается в выходном окне лазера мощностью  $P = 100$  кВт за время функционирования  $t = 1$  мин при различных значениях коэффициента пористости насадки и высоты холодильника.

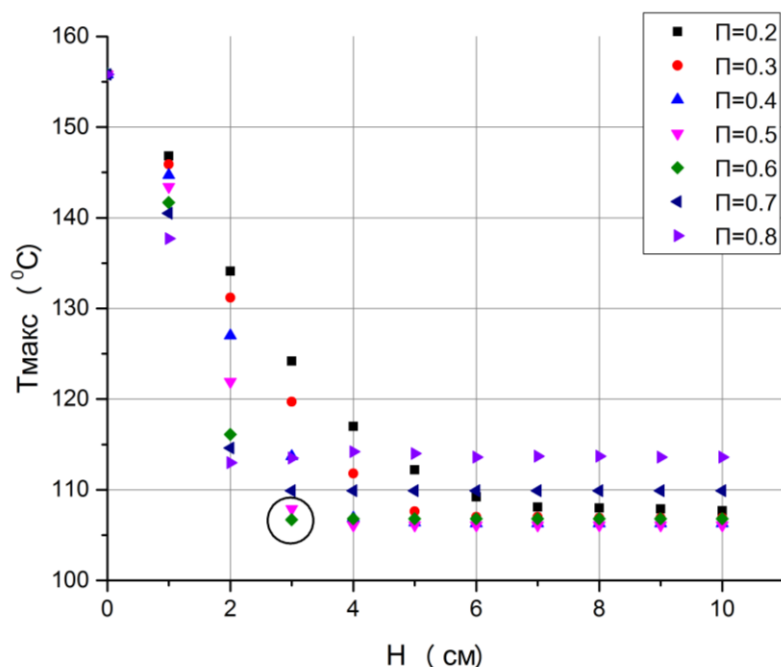


Рис. 9. Максимальная температура выходного окна, охлаждаемого криоаккумуляторами с различной высотой и пористостью насадки

На рис. 9 представлены результаты расчета, из которых видно, что наименьшая максимальная температура составляет порядка  $107^{\circ}\text{C}$ . Из соображений минимизации массогабаритов, оптимальными параметрами (выделены окружностью на рисунке) являются  $P = (0.6 \pm 0,05)$ ,  $H = (3 \pm 0,5)$  см. Масса криоаккумулятора данной конфигурации составила  $(280 \pm 45)$  г. При этом видно, что увеличение высоты криоаккумулятора сверх оптимального значения нецелесообразно, т.к. не приводит к уменьшению максимальной температуры в окне.

Для оценки влияния дополнительного охлаждения окна на эффективность работы лазерной установки был проведен расчет интенсивности излучения лазера на удаленном объекте для случаев, когда выходное окно охлаждалось только периферийным жидкостным охлаждением, и когда окно дополнительно к этому охлаждалось криоаккумулятором. Мощность излучения при этом варьировалась от 0 до максимально допустимого значения, определяемого пределом лучевой стойкости материала. По результатам расчетов было установлено, что дополнительное охлаждение выходного окна позволяет увеличить максимальную интенсивность излучения на удаленном объекте на 40 %.

**В заключении** сформулированы основные результаты:

1. Разработаны математические модели функционирования выходного окна мощного непрерывного лазера, включающие в себя теплофизическую, механическую и оптическую части.

2. Разработан вычислительный инструмент (программы для ЭВМ), позволяющий численно моделировать поведение выходного окна мощного лазера на основе разработанной математической модели.

3. Описан и численно обоснован метод компенсации вносимых окном оптических искажений за счет корректировки фокусного расстояния телескопа.

4. Описано и численно обосновано целесообразность использования комбинированных выходных окон двухкомпонентной конструкции, когда центральная и периферийная области окна изготовлены из различных материалов.

5. Описан и численно обоснован метод дополнительного охлаждения двухкомпонентных выходных окон с непрозрачной центральной областью при помощи криоаккумулятора.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И., Филин С.А., Рогалина Н.А.* Мощный лазер // Патент России № 2608309. 2017. Бюл. № 2.
2. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И., Филин С.А.* Моделирование термомеханических процессов в выходном окне высокомоощного CO<sub>2</sub>-лазера // Изв. РАН сер. физ. 2016. Т. 80. № 10. С. 1410 – 1416.
3. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И.* Термооптические процессы в окне мощного газового лазера // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 5. С. 873 – 880.
4. *Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krymsky M.I. Kaplunov I.A.* On the possibility of increasing the resource of high-power laser optics by using two-component output windows // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1915. № 1. DOI: 10.1063/1.5017343.
5. *Rogalin V.E., Ashkinazi E.E., Popovich A.F., Ralchenko V.G., Konov V.I., Aranchii S.M., Ruzin M.V., Rogozhin M.V.* Behavior of the Water-Cooled Polycrystalline Diamond Plate at Extreme Densities of Laser Radiation // Physics of Wave Phenomena. 2018. V. 26. №. 2. P. 75 – 84. DOI: 10.3103/S1541308X18020012.
6. *Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krymsky M.I. Kaplunov I.A.* Combined output windows for high-power lasers // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 2053. DOI: 10.1063/1.5084419
7. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И.* Кривоаккумулятор для термостабилизации лазерных диодов // Стратегическая стабильность. 2019. № 1 (86). С. 60 – 64.
8. *Крымский М.И., Рогалин В.Е., Аранчий С.М., Рогожин М.В.* Пути повышения эффективности дискового лазера за счет использования алмазных теплоотводов // Материалы XIX всероссийской конференции «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар. 2013. С. 226 – 231.

9. *Крымский М.И., Роголин В.Е., Аранчий С.М., Рогожин М.В.* Расчет теплофизических процессов в дисковом лазере // Официальный каталог: IX Международного форума «Оптические системы и технологии» (OPTICS-EXPO 2013). Москва. 2013. С. 25 – 26.
10. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И.* Моделирование термомеханических процессов в выходном окне высокомоощного CO<sub>2</sub>-лазера // Тезисы докладов VI межд. конф. «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов». Москва. 2015. С. 267.
11. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И.* Моделирование термомеханических процессов в выходном окне высокомоощного CO<sub>2</sub>-лазера // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 7 (38). С. 33 – 40. URL: <http://research-journal.org/?p=15298> (дата обращения 09.01.2019).
12. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И.* Термооптические процессы в окне мощного газового лазера // Аннотированный сб. материалов конференции «Всероссийская научно-техническая конференция «Расплетинские чтения – 2016». М. «Алмаз-Антей». 2015. С. 138.
13. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Евстигнеев В.Л.* Оптическая стойкость выходных окон мощных лазерных систем // Материалы XXII межд. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар. 2016. С. 147 – 155.
14. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И., Евстигнеев В.Л.* Лазерные поликристаллические алмазные окна с центральной монокристаллической областью // Материалы XXIII межд. конф. «Оптика и спектроскопия конденсированных сред». Краснодар. 2017. С. 276 – 281.
15. *Рогожин М.В., Роголин В.Е., Крымский М.И.* Двухкомпонентные выходные окна в лазерных системах высокой мощности // Сб. научных трудов VI Международной конференции «Фотоника и информационная оптика». Москва. 2017. С. 524 – 525.

16. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И.* Термостабилизация лазерных диодов с помощью криоаккумулятора // Сб. научных трудов VII Международной конференции «Фотоника и информационная оптика» Москва. 2018. С. 496 – 497.

17. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И., Каплунов И.А.* О возможности повышения ресурса оптики высококомощных лазеров за счет использования двухкомпонентных выходных окон // В сборнике: XI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург. 2017. С. 65.

18. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И., Каплунов И.А.* Повышение ресурса выходных окон высококомощных лазеров с неустойчивым резонатором. // В сборнике: XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». Екатеринбург. 2018. С. 162.

19. *Rogozhin M.V., Rogalin V.E., Krymsky M.I. Kaplunov I.A.* On the possibility of increasing the service life of high-power laser optics through the use of polycrystalline diamond windows with a central monocrystalline // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss. 1. P. 34 – 40. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.1.034-040.

20. *Рогожин М.В., Рогалин В.Е., Крымский М.И.* Комбинированные выходные окна мощных лазеров // Тезисы докладов XX Харитоновских чтений «Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии». Саров. 2018. С. 77 – 79.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Никишин Г.Д., Стехин В.М., Смирнов В.Н. и др.* Возможности применения лазерной дезактивации при утилизации оборудования ядерных энергетических установок. Владивосток, 2002.
2. *Junichi A., Noriaki T., Kozo Y., Toshio A.* Application of chemical oxygen iodine laser (COIL) for dismantling of nuclear facilities // *Progress in Nuclear Energy*. 1998. V. 32. № 3-4. P. 517 – 523.
3. *Максин С.В., Попов С.В., Базлев Д.А., Апарин Ю.К., Пантелеев А.В., Сорокин Ю.В.* Способ разрушения ледяного покрова. Патент России № 2463200. 2012. Бюл. № 28.
4. *Бабаев И.К., Синайский В.В., Финогенов А.И.* Мощные CO<sub>2</sub>- и СО-лазеры // в н. - техн. сб. Лазерные и оптические системы. -М.: ГИЦ НПО Астрофизика. 1994. - С. 64 – 71.
5. *Рогалин В.Е.* Прозрачные материалы для мощных импульсных CO<sub>2</sub>-лазеров // *Материалы электронной техники*. 2013. № 2. с. 11 – 18.
6. *Sparks M., Cottis M.* Pressure-induced optical distortion in laser windows // *J. Appl. Phys.* 1973. V. 44. № 2. P. 787 – 794.
7. *Sparks M.* Optical distortion by heated windows in high-power laser systems // *J. Appl. Phys.* 1971. V. 42. № 12. P. 5029 – 5046.
8. *Sparks M., Chow H.C.* High-power 2- to 6- um window material figures of merit with edge cooling and surface absorption included // *J. Appl. Phys.* 1974. V. 45. № 4. P. 1510 – 1517.
9. *Аполлонов В.В.* Силовая оптика // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. № 2. с. 102 – 121.

10. *Малашко Я.И., Наумов М.Б.* Системы формирования мощных лазерных пучков. Основы теории. Методы расчёта. Силовые зеркала. Монография. – М.: Радиотехника, 2013. – 328 с.

11. *Шмаков В.А.* Силовая оптика. - М.: Наука, 2004. – 318 с.