

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Института лазерной физики Сибирского
отделения
Российской академии наук
(ИЛФ СО РАН)
д.ф.-м.н. И.Ф. Шайхисламов



« 26 » января 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
на диссертацию в виде научного доклада **Палашова Олега Валентиновича «Подавление термонаведенных эффектов в оптических элементах твердотельных лазеров»**,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 — лазерная физика.

Диссертационная работа в виде научного доклада Палашова Олега Валентиновича посвящена разработке методов и исследованию возможности подавления термонаведенных эффектов в лазерных элементах, ограничивающих среднюю мощность твердотельных лазеров, используемых для решения фундаментальных и прикладных задач.

Актуальность темы

Увеличение мощности твердотельных лазеров, работающих с одновременно высокой пиковой и средней по времени мощностью стало одним из главных направлений развития лазерной физики, в связи их востребованностью в различных областях научных, научно-технологических и специальных приложений.

Актуальным является вопрос о влиянии ограничивающего фундаментального фактора – тепловыделения – на возникновение негативных термонаведенных эффектов, таких как увеличение средней по объему температуры и появление градиента температуры, в лазерных элементах. Наиболее подвержены тепловому самовоздействию активные элементы лазеров, вследствие воздействия излучения накачки, и

магнитооптические элементы оптических изоляторов Фарадея (ИФ) из-за поглощения лазерного излучения на уровне $\sim 10^{-3} \text{ см}^{-1}$.

Ослабить воздействие термонаведенных эффектов можно либо за счет уменьшения количества выделяемого в лазерном элементе тепла, либо за счет уменьшения его влияния. В первом направлении исследования направлены на поиск и диагностику новых материалов и изучение их лазерных, термооптических и магнитооптических характеристик, включая их температурные зависимости, с целью определения перспективности использования в конкретных диапазонах параметров лазерного излучения. Важный метод первого направления – охлаждение лазерных элементов до температуры жидкого азота. Второе направление включает в себя различные методы компенсации термонаведенных эффектов, использование оптимальных геометрий и ориентаций (в случае кристаллов) лазерных элементов, теплоотводов и т.п. Оба направления исследований, рассмотренных в диссертации, актуальны.

Структура и содержание диссертации

Диссертация в виде научного доклада состоит из введения, основного содержания работы, состоящего из четырех глав, заключения, списка литературы из 122 наименований и списка научных публикаций квартилей Q1 и Q2 из 55 наименований (из них 37 за последние 10 лет), в котором изложены материалы диссертации. Общий объем работы – 80 страниц, в том числе 31 рисунок, 1 таблица.

Во введении определен предмет исследования и обоснована актуальность темы диссертационной работы; степень разработанности темы; сформулированы цель и основные задачи исследования; приведены защищаемые положения; дана оценка научной новизны полученных результатов и их теоретической и практической значимости; описаны методология и методы исследования; приведены сведения о достоверности полученных результатов и апробации работы; дана информация о публикациях по теме работы и определен личный вклад автора.

Первая глава диссертации в виде научного доклада посвящена исследованию термооптических характеристик перспективных лазерных материалов при комнатной температуре. Введены основные определения, необходимые для рассмотрения представленных в диссертации результатов.

Определена перспективность целого ряда лазерных материалов по результатам измерений таких характеристик, как: параметр оптической анизотропии ξ для тербий содержащих кристаллов фторидов $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ (NTF) и фианита $\text{Tb}_6\text{Zr}_2\text{O}_{13}$ (TCZ);

зависимость ξ кристалла фторида кальция CaF_2 от допирования ионами Yb и Tb; термооптическая постоянная Q, характеризующая среду с точки зрения термонаведенной анизотропии, для кристаллов NTF, TCZ, иттербий содержащих керамик полупрозрачных оксидов Lu_2O_3 , Y_2O_3 и Sc_2O_3 , керамики Tb_2O_3 ; термооптическая постоянная P, характеризующая среду с точки зрения тепловой линзы, для кристалла TCZ, керамик граната TGG, Yb: Lu_2O_3 , Yb: Y_2O_3 , Sc_2O_3 , Tb_2O_3 ; постоянная Верде $V(\lambda)$ в зависимости от допирования редкоземельными ионами кристалла TSAG, керамик TAG, Tb_2O_3 , тербий-содержащих фосфатных стекол; $V(\lambda)$ кристаллов ZnSe, NTF, TCZ, керамики TAG; стекла TBG; магнитооптическая добротность кристаллов TSAG, NTF, TCZ, CeF_3 , керамик гранатов TGG, TAG и др.

Отмечено, что керамики полупрозрачных оксидов, активированных трехвалентными ионами иттербия вносят в лазерное излучение меньшие поляризационные и фазовые искажения, чем кристалл Yb:YAG; а керамики Tb_2O_3 и Dy_2O_3 обладают еще и существенно большей константой Верде и, как следствие, большей максимальной рабочей мощностью, чем кристалл или керамика TGG.

Предложено использовать известные материалы: селенид цинка и фторид кальция в новом качестве – в ИФ на высокую лазерную мощность. В поликристалле ZnSe диамагнитные свойства обеспечивают отсутствие деполяризации, определяемой зависимостью $V(T)$; широкий спектр прозрачности материала дает возможность изготовления ИФ мощного излучения в «безопасном для глаз» и среднем ИК-диапазонах. На ZnSe создан ИФ на $P_{\max} \approx 1,3$ кВт и доказана работоспособность прибора при $P_{\max} > 2,5$ кВт.

Во второй главе диссертации в виде научного доклада представлены результаты исследования термооптических характеристик перспективных лазерных материалов на базе кристаллов фторидов и фосфатов, керамик ряда гранатов и борогерманатных и фосфатных стекол при криогенном охлаждении. Исследования проводились на разработанной автоматизированной криогенной системе (АКС), позволяющей производить температурные измерения термооптических характеристик лазерных материалов в вплоть до температур жидкого азота. На базе АКС было разработано новое устройство – криогенный изолятор Фарадея (КИФ) для одновременного криогенного охлаждения магнитооптического элемента (МОЭ) изолятора и магнитных систем. Исследованы системы на постоянных магнитах из ферромагнитных сплавов Sm-Co и Nd-Fe-B. Магниты Sm-Co при охлаждении до 90 К демонстрируют увеличение магнитного поля на ~20 %, магниты из Nd-Fe-B не приводят к увеличению магнитного поля, а его

значение повторяется от реализации к реализации с точностью не хуже 2%. Определена перспективность использования лазерных материалов для КИФ. Отмечается, что в КИФ необходимо учитывать также деполяризацию, определяемую неоднородностью магнитного поля.

Третья глава диссертации в виде научного доклада посвящена исследованию подавления термонаведенных эффектов за счет ориентации оптических осей и геометрии лазерных элементов.

Отмечается, что большинство твердотельных активных элементов лазеров (АЭ) и МОЭ изготавливаются из изотропных кристаллов кубической сингонии. Главной особенностью поляризационных искажений в них является отклонение направления собственных поляризаций термонаведенного двулучепреломления от радиальных и тангенциальных направлений лазерного элемента. Поэтому термонаведенные искажения, включая их поперечную структуру и величину, могут существенно зависеть от ориентации и геометрии кубических кристаллов.

Приводятся результаты исследований характеристик АЭ и МОЭ по подавлению поляризационных искажений в кубических кристаллах с ориентацией [110], подавлению термодеполяризации в кристаллах CaF_2 с ориентацией [111] и TSAG с ориентацией [001], кроме того, фторидах NTF с ориентацией [C], изучено влияние анизотропии одноосного кристалла CeF_3 на характеристики оптического изолятора и описано ослабление поляризационных искажений в дисковых магнитооптических элементах.

Экспериментально исследовано влияние ориентации [110] на термодеполяризацию при большой мощности тепловыделения, продемонстрирована ее оптимальность при условии, что диаметр накачки больше диаметра лазерного излучения и значительно меньше диаметра кристалла. Такое уменьшение деполяризации может быть эффективно использовано в дисковых АЭ, поскольку диаметр диска должен быть значительно больше диаметра рабочей области во избежание паразитной поперечной генерации.

Предложен метод измерения параметра оптической анизотропии ξ по поведению термонаведенной деполяризации в кубических кристаллах в ориентации [001] который позволяет определять не только его модуль, но и знак.

Созданы изоляторы Фарадея с укороченными МОЭ из стекла МОС-04 или кристалла TGG за счет использования магнитной системы на базе сверхпроводящих соленоидов или КИФ. Оценены перспективы создания ИФ, которые могут работать при мощности в десятки киловатт.

Четвертая глава диссертации в виде научного доклада описывает исследование подавления термонаведенных эффектов в магнитооптических элементах за счет различных схем компенсаций.

Приводятся результаты по ИФ, выполненным по схеме «внутренней компенсации» на кристаллах TSAG, TGG керамике и TAG керамике. Все оптические элементы в такой схеме находятся внутри магнитной системы, МОЭ идентичны и в одинаковой ориентации. Разработан и исследован ИФ с внутренней компенсацией, выполненный на уникальных широкоапертурных кристаллах TGG диаметром 40 мм в ориентации [001]. В ИФ на TSAG деполаризация подавлена в 20 раз

Предложена и экспериментально исследована новая схема ИФ с внешней компенсацией термонаведенных искажений. Она позволяет модернизировать традиционные ИФ, существенно увеличивая P_{\max} . При этой конфигурации к традиционному ИФ добавляется компенсатор, состоящий из двух оптических элементов: поляризационного вращателя и дополнительного оптического элемента (ДОЭ). Появление ДОЭ, материал которого в общем случае может быть отличным от материала МОЭ, например, при выборе материала с противоположным по знаку значением dn/dT дополнительно позволяет компенсировать тепловую линзу. Функцию ДОЭ могут выполнять другие оптические элементы лазерной системы, например АЭ, поляризатор.

В схеме внешней компенсации в КИФ с помощью стекла FK51 продемонстрирована одновременная практически полная компенсация термодеполаризации (ослабление γ в 6,3 раза, ограничиваемое «холодной» деполаризацией) и тепловой линзы (в 3,5 раза, с остаточным $F > 200\text{м}$). Согласно теоретическим оценкам, при использовании в качестве МОЭ и ДОЭ кристаллов GGG с поглощением 10^{-3} см^{-1} , $P_{\max} > 20 \text{ кВт}$.

Разработан ряд ИФ для использования в высоком вакууме ($10^{-7} - 10^{-8} \text{ Торр}$) в интерферометрах коллабораций LIGO и VIRGO, использующихся при регистрации гравитационных волн, выполненный по схеме внутренней компенсации термодеполаризации. Особенностью ИФ, используемых в подобных интерферометрах, является необходимость работы с излучением высокой средней мощности в условиях высокого вакуума. При этом все элементы ИФ должны соответствовать общим требованиям к вакуумным материалам, а МОЭ должны быть обеспечены надежным теплоотводом в отсутствие конвективного охлаждения.

Описывается принципиальная схема, характеристики магнитных систем и лазерных элементов, особенности конструкции и сборки вакуумных ИФ. Экспериментально исследуются зависимости степени изоляции от мощности падающего излучения и

давления, величины тепловой линзы в МОЭ от мощности излучения, теплового дрейфа пучка от времени.

Стоит отметить, что каждая глава заканчивается своим заключением, что дополнительно структурирует работу и положительно сказывается на восприятии материала.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Научная новизна результатов работы

Можно отметить несколько наиболее интересных научных результатов.

Предложен метод компенсации термонаведенного двулучепреломления с возможностью одновременной компенсации тепловой линзы. Экспериментально продемонстрирован ряд преимуществ метода.

Впервые экспериментально обнаружена и измерена деполяризация, связанная с зависимостью постоянной Верде от температуры и показано, что при охлаждении в тонких магнитооптических элементах она может давать основной вклад в термодеполяризацию.

Исследовано влияние критической ориентации кристаллов на термодеполяризацию в кристаллах с отрицательным параметром оптической анизотропии. Достигнуто подавление термодеполяризации в кристаллах CaF_2 и NTF относительно термодеполяризации в ориентации [001] в 20 и 10 раз, соответственно. Исследовано влияние ориентации [110] на термодеполяризацию при большой мощности тепловыделения, продемонстрирована перспективность ее использования в дисковых активных элементах с торцевой накачкой.

Исследованы величины оптической анизотропии, её зависимости от допирования редкоземельными ионами, величины термооптических постоянных, зависимости величины постоянной Верде от длины волны, магнитооптической добротности для различных кристаллов, керамик и стёкол. Определена перспективность целого ряда лазерных материалов на основе результатов проведённого исследования.

Предложено использовать известные материалы: селенид цинка, тисонит и фторид кальция в новом качестве – в качестве изоляторов Фарадея для излучения высокой мощности, в том числе в среднем ИК-диапазоне. На ZnSe создан изолятор Фарадея на максимальную мощность ~1,3 кВт и доказана работоспособность прибора при мощности излучения более 2,5 кВт. Создан изолятор Фарадея на основе CeF_3 , упрощающий

юстировку элемента за счёт естественной оптической анизотропии материала, и обеспечивающий работу при мощности излучения более 700 Вт.

Определена перспективность использования лазерных материалов, дающая новые возможности для криогенных изоляторов Фарадея. В частности, определена максимально допустимая мощность лазерного излучения, которая составила более 5 кВт, 6 кВт и 10 кВт для кристаллов TGG, TSAG и керамики Tb₂O₃, соответственно.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы обусловлена необходимостью комплексного исследования термонаведенных эффектов и разработки способов их подавления в твердотельных лазерах с высокой средней мощностью. Комплексное исследование включает в себя поиск новых лазерных материалов; исследование зависимости свойств лазерных материалов от температуры, в том числе при криогенном охлаждении, и зависимости свойств от ориентаций кристаллографических осей для кристаллов; исследование связи термонаведенных эффектов в лазерных элементах от их геометрии и геометрии теплоотводов. В диссертации проведено комплексное исследование термонаведенных эффектов. Предложены и разработаны различные методы их компенсации.

Одним из результатов исследований является разработка вакуумных изоляторов Фарадея для интерферометров LIGO и VIRGO, благодаря которым были экспериментально зарегистрированы гравитационные волны.

Результаты исследований характеристик лазерных материалов и поведения их от температуры, как известных материалов (например, кристаллы TGG, CeF₃), так и новых (например, кристалл TCZ, стекло TBG, керамика Tb₂O₃) носят фундаментальный характер и вносят существенный вклад в понимание актуальности использования конкретного материала для конкретной задачи. Результаты исследований характеристик фторидов CaF₂, BaF₂ и SrF₂, которые широко используются в качестве оптических материалов, в качестве лазерно-активных элементов при допировании редкоземельными ионами, в качестве магнитоактивных элементов при допировании ионами Tb³⁺ в различных лазерных системах с одновременно высокой средней и пиковой мощностью, включая криогенно охлаждаемые.

Результаты исследований диссертации могут быть использованы при развитии отечественных технологий производства различных лазерных материалов. Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях: МГУ,

Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Институт лазерной физики СО РАН, НИЯУ МИФИ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ.

Стоит также отметить личный вклад автора в работу. Автор внес определяющий вклад в концептуализацию направлений и постановку всех задач диссертационного исследования, а также весомый вклад в интерпретацию экспериментальных результатов, численных расчетов и подготовку публикаций. В ряде экспериментальных исследований автором также непосредственно осуществлялась разработка и оптимизация экспериментальных схем.

Важной стороной исследований является постановка совместных исследовательских работ с другими научными коллективами (оценка необходимых характеристик образцов; планирование ожидаемых результатов; согласование технического задания с изготовителями лазерного материала и т.п.), которая практически всецело проведена автором.

Все выносимые на защиту положения и результаты получены под научным руководством автора или при его непосредственном участии.

У диссертации есть недостатки, которые необходимо отметить.

Некоторые основные положения, выносимые на защиту, сформулированы недостаточно чётко:

1. Защищаемое положение №3 сформулировано следующим образом: "Предложенный метод ослабления паразитных тепловых эффектов путем охлаждения до азотных температур изолятора Фарадея (либо элемента из парамагнитного материала, либо и лазерного элемента и магнитной системы из Ne-Fe-B или Sm-Co, которые практически неотличимы при 80 К по магнитной энергии) позволяет увеличить максимально допустимую лазерную мощность на один-два порядка в зависимости от используемой схемы изолятора. Например, охлаждение до 80К популярного кристалла TGG уменьшает его термооптические константы Q, P и ξ в 5,7; 6,8 и 1,7 раза соответственно, что приводит к существенному ослаблению паразитных тепловых эффектов".

Защищаемое положение сформулировано размыто. Первое предложение содержит конструкцию из трёх отдельных частей, а также оценки: "практически неотличимы", "один-два порядка в зависимости от используемой схемы изолятора". При этом второе предложение "Например, ..." представляет собой конкретный результат.

2. Защищаемое положение №4 сформулировано следующим образом: "Новый класс материалов – полупрозрачные оксиды редкоземельных металлов – обладает существенным преимуществом по сравнению с популярными сегодня гранатами для использования в лазерах с высокой средней мощностью. Например, керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb:Sc}_2\text{O}_3$ вносят в лазерное излучение меньшие поляризационные и фазовые искажения, чем кристалл Yb:YAG ; а керамики Tb_2O_3 и Dy_2O_3 обладают большей константой Верде и максимальной рабочей мощностью, чем кристалл или керамика TGG."

Конкретная научная новизна и в чём именно состоит защищаемое положение в тексте диссертационной работы не сформулированы. Утверждение о том, что полупрозрачные оксиды редкоземельных металлов обладают существенным преимуществом по сравнению с кристаллами гранатов некорректно, так как сравнение проводится по ограниченному числу характеристик этих сред, связанных с деполяризационными и фазовыми искажениями излучения в активных элементах. Этого сравнения недостаточно, чтобы делать вывод о преимуществе полупрозрачных оксидов редкоземельных металлов над кристаллами гранатов в лазерных системах с высокой средней мощностью.

Есть также замечания.

1. Оформление диссертации могло бы быть выполнено значительно лучше. Низкое разрешение многих рисунков затрудняет их понимание, во многих из них текст приводится на английском языке. Например, на рис. 3.1 кривые подписаны цифрами, которых практически не видно на графике, на рис. 3.2 текст пересекается с кривыми. Помимо этого, на некоторых графиках есть кривые, которые нигде не упоминаются. Например, на рисунке 1.2 (а) есть цветные вставки, о которых нет никаких упоминаний ни в подписи к рисунку, ни в тексте раздела. Также на упомянутом рисунке есть «зависимость деполяризации от мощности в TGG», хотя в тексте раздела кристалл TGG не упоминается.

2. Автор использует жаргонизмы, например, «мощность тепла, протекающего через образец», «Допустимая лазерная мощность ИФ ... 5 кВт». Помимо этого, в тексте активные элементы и магнитооптические элементы называются «лазерными элементами». Это значительно усложняет чтение текста диссертации.

3. Некоторые результаты, представленные в диссертационной работе, описаны недостаточно подробно:

- Например, в разделе 1.5. сравниваются характеристики сред, допированных итербием (керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Sc}_2\text{O}_3$ и кристаллы Yb:YAG). Из этого сравнения автор впоследствии делает вывод, что керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Sc}_2\text{O}_3$

вносят в лазерное излучение меньшие поляризационные и фазовые искажения, чем кристалл Yb:YAG. Однако у керамик допирование указано 1.8 и 2.5 %, что меньше, чем у кристалла Yb:YAG (10 %). Выбор материалов с существенно различающимся допированием никак не обосновывается, а влияние допирования на измеренные характеристики не обсуждается.

- В разделе 3.1. представлены результаты анализа изменения деполяризации излучения в кубических кристаллах в зависимости от мощности накачки. На рис. 3.1. для ориентаций [110] и [001] представлены как экспериментальные зависимости, так и расчетные. В то же время для ориентации [111] приводится только расчётная зависимость. Тем не менее, сделан вывод, что ориентация [111] является наихудшей из представленных.

В работе встречаются опечатки, например, стр.76 в ссылке на работу 14А неверно указан журнал: JOSA B вместо Optics Letters.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования и не влияют на высокую научную значимость полученных автором результатов.

Заключение

Основные научные результаты достаточно полно отражены в 55 опубликованных статьях в реферируемых журналах, включенных в перечень ВАК, в том числе 37 в журналах первого (Q1) и второго (Q2) квартилей по международной базе Scopus за последние 10 лет и доложены на семинарах ИПФ РАН, «ГОИ им. С.И. Вавилова», ИКИ РАН, Всероссийских и Международных конференциях.

Содержание диссертации, научные положения и сформулированные выводы дают основание полагать, что цель исследования достигнута, а сформулированные в диссертации задачи успешно решены.

Совокупность полученных автором работы результатов может быть квалифицирована как научное достижение высокого уровня.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями на 26 сентября 2022 года), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук. Автор работы, Палашов Олег Валентинович, достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 — лазерная физика.

Диссертация Палашова О.В. и отзыв на неё обсуждены и одобрены на заседании научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН) 26 января 2024 года, протокол № 1.

Отзыв составил

Главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН,

д.ф.-м.н. Прудников Олег Николаевич

E-mail: o.nsu@gmail.com



Подпись главного научного сотрудника ИЛФ СО РАН

Прудникова Олега Николаевича

удостоверяю

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН

к.ф.-м.н. Покасов Павел Викторович



Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации в соответствии с уставом: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Сокращённое наименование: ИЛФ СО РАН

Юридический адрес: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 15Б

телефон: +7 (383) 333-29-67

электронная почта: info@laser.nsc.ru

web-сайт: <http://www.laser.nsc.ru>